



**Tiago da Conceição Vieira**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Ensaio Experimental de métodos para simulação da camada limite atmosférica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira, Prof. Auxiliar Convidada,  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Luís Manuel Chagas Gil,  
Prof. Auxiliar, FCT – UNL

Arguente: Prof. Doutor José Fernando de Almeida Dias  
Prof. Associado, FCT – UNL

Vogal: Prof. Doutora Diana Filipa da Conceição Vieira  
Prof. Auxiliar Convidado, FCT - UNL

**Dezembro, 2019**



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA



### **Ensaio Experimental de métodos para simulação da camada limite atmosférica**

Copyright © Tiago da Conceição Vieira, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer à minha orientadora, Prof. Diana Vieira, pela disponibilidade incondicional que teve ao longo deste período.

À minha colega Maria Branco, pelos conselhos e troca de opiniões que tivemos sobre a temática.

Aos meus colegas, Filipe Serralheiro Santos e António Cachaço, pela ajuda no projeto e construção do modelo cúbico.

E por último mas não menos importante, aos meus familiares, por patrocinarem esta tão bela jornada académica.



## Resumo

---

A ação do vento sobre estruturas é influenciada pelos perfis de velocidades e de turbulência sobre elas incidentes, que caracterizam a Camada Limite Atmosférica (CLA). Neste trabalho apresentam-se métodos experimentais e simulação de CLA e exemplifica-se a sua utilização para a determinação da ação do vento sobre edifícios.

Neste trabalho experimental, foi realizada a simulação da CLA no túnel de vento do departamento de Fluidos e Termodinâmica da FCT-UNL. Utilizando elementos passivos para criar rugosidade aerodinâmica, onde foi possível simular o perfil de velocidades médias correspondente a um terreno urbano bem como a um terreno suburbano, obtendo-se resultados bastante satisfatórios. Os resultados da medição dos coeficientes de pressão num modelo cúbico sujeito ao perfil de velocidades simulado corresponderam ao esperado na face frontal do modelo, enquanto os Cps obtidos na face a tardoiz não foram exatamente os esperados, obtendo-se coeficientes positivos em vez de negativos.

**Palavras-chave:** Ação do Vento em edifícios, Camada Limite Atmosférica, Túnel de Vento

---





# Abstract

---

The wind action on buildings is influenced by the velocity and turbulence parameters of the approaching flow that are dependent on the characteristics of the Atmospheric Boundary Layer (ABL). In this work, experimental methods of simulation of the ABL are applied and used for the determination of wind action on buildings.

In the experimental case, the simulation of the ABL was made in the FCT-UNL, wind tunnel. Using passive aerodynamic roughness elements, it was possible to simulate the mean velocity profiles of a urban terrain and a suburban terrain, obtaining good experimental results. The measurement of the pressure coefficients in the cubic model located in the ABL simulation section corresponded to the expected values in the front face, but in the rear face the coefficient's were positive which dos not correspond with the theoretical results.

**Keywords:** Atmospheric Boundary Layer, Wind action on buildings, Wind tunnel

---



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>V</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>ACRÓNIMOS .....</b>	<b>XIX</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Camada Limite Atmosférica.....	5
2.2 Simulação da Camada Limite em Túnel de Vento.....	11
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>19</b>
3. ESCOAMENTO DO VENTO EM TORNO DE EDIFÍCIOS .....	19
3.1 Características do escoamento .....	19
3.2 Coeficientes de Pressão.....	22
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>23</b>
4. COMPONENTE EXPERIMENTAL.....	23

4.1	<i>Equipamento e Instrumentação</i> .....	23
4.2	<i>Técnica Experimental de Simulação de CLA</i> .....	27
4.2.1	Construção dos Pináculos .....	28
4.2.2	Construção do modelo de um edifício cúbico.....	34
4.3	<i>Preparação da componente experimental</i> .....	37
<b>CAPÍTULO 5</b>	.....	<b>39</b>
5.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO .....	39
5.1	<i>Ensaaios com o Túnel de vento em vazio</i> .....	39
5.2	<i>Verificação da CLA gerada</i> .....	43
5.2.1	Ensaio experimental para tipo de terreno 4 com pináculos grandes .....	43
5.2.2	Ensaio experimental para terreno tipo 2 com pináculos grandes.....	47
5.2.3	Ensaio experimental para terreno tipo 2 com pináculos pequenos .....	51
5.3	<i>Coefficientes de pressão num edifício cúbico</i> .....	53
5.3.1	Leitura dos Cps para o tipo de terreno 4 com pináculos grandes .....	54
5.3.2	Leitura dos Cps para o terreno de tipo 2 com pináculos grandes .....	57
5.3.3	Leitura dos Cps para o terreno tipo 2 para pináculos pequenos .....	60
5.4	<i>Discussão de resultados</i> .....	64
<b>CAPÍTULO 6</b>	.....	<b>73</b>
6.	CONCLUSÕES .....	73
6.1	<i>Trabalhos futuros</i> .....	74
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	.....	<b>75</b>

## Lista de Tabelas

TABELA 2.1- TIPOS DE TERRENOS AGRUPADOS ATRAVÉS DA SUA RUGOSIDADE AERODINÂMICA SEGUNDO DAVENPORT [9] .....	8
TABELA 2.2 - DIFERENTES TIPOS DE TERRENO E SEU RESPECTIVO A SEGUNDO DYRBYE AND HANSEN [10] E A VDI GUIDELINE 3783 [11]. .....	9
TABELA 2.3- VALORES DE $z_0$ SEGUNDO A NORMA VDI GUIDELINE 3783 (*) E SEGUNDO O EUROCÓDIGO (**) .....	10
TABELA 2.4- TABELA RESUMO COM ALGUMAS PUBLICAÇÕES COM JUNÇÃO DE PINÁCULOS E ELEMENTOS DE RUGOSIDADE (TABELA BASEADA DE [17]) .....	15
TABELA 5.1- ESQUEMA DAS COORDENADAS DAS TOMADAS DE PRESSÃO NO MODELO CÚBICO .....	54
TABELA 5.2- VÁRIOS ESTUDOS COM O FOCO NO ESTUDO DOS CPS NUM MODELO CÚBICO (TABELA BASEADA DE [36]) .....	69



## Lista de Figuras

FIGURA 2.1- ALTURA DA CLA E PERFIL DE VELOCIDADES DO TIPO DE POTÊNCIA PARA CADA TIPO DE TERRENO (IMAGEM ALTERADA DE [6]) .....	6
FIGURA 2.2- ESQUEMA DA CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA [8] .....	7
FIGURA 2.3- PERFIL DE VELOCIDADES MÉDIAS LOGARÍTMICO [8] .....	10
FIGURA 2.4- EXPERIÊNCIA DE OWEN E ZIENKIEWICZ [14] .....	12
FIGURA 2.5- ARRANJO DA EXPERIÊNCIA DE PHILLIPS ET AL. [6] .....	13
FIGURA 2.6- TIPOS DE PINÁCULOS USADOS POR COUNIHAN [2] .....	14
FIGURA 2.7- ESQUEMA DA EXPERIÊNCIA DE IRWIN (IMAGEM BASEADA DE [1]. ....	14
FIGURA 2.8- TIPO DE PINÁCULO UTILIZADO POR PANG E LIN [45] .....	17
FIGURA 2.9- ESQUEMA DO SISTEMA DE TURBINAS DE CAO (IMAGEM BASEADA DE [32]). ....	18
FIGURA 3.1- ESCOAMENTO SOBRE <i>BLUFF BODIES</i> .....	20
FIGURA 3.2- ZONA DE SEPARAÇÃO DO DESCOLAMENTO COM RECOLAMENTO .....	20
FIGURA 3.3- ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA PLACA PARA DIFERENTES VALORES DE REYNOLDS .....	21
FIGURA 4.1- CÂMARA DE EXPERIÊNCIAS DO TÚNEL DE VENTO DA FCT-UNL .....	24
FIGURA 4.2- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM TUBO DE PITOT ESTÁTICO A) E DE UM TUBO DE PITOT SIMPLES B) .....	25
FIGURA 4.3- MONTAGEM EXPERIMENTAL PARA MEDIÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES .....	26
FIGURA 4.4- LOCALIZAÇÃO DO TUBO DE PITOT ESTÁTICO NO TÚNEL AERODINÂMICO .....	27
FIGURA 4.5- IMAGEM DO MANÓMETRO BETZ2500 UTILIZADO NAS MEDIÇÕES .....	27
FIGURA 4.6- DISPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS SEGUNDO IRWIN PARA A CRIAÇÃO DA CLA [1] .....	28
FIGURA 4.7- DESENHO TÉCNICO DOS PINÁCULOS .....	32
FIGURA 4.8- IMAGEM DA RAMPA CRIADA NAS PLACAS DE MDF .....	33
FIGURA 4.9- IMAGENS DOS PINÁCULOS GRANDES CONTRUÍDOS COM AS DIMENSÕES CALCULADAS SEGUNDO O ESTUDO DE IRWIN [1] .....	34
FIGURA 4.10- IMAGEM DOS PINÁCULOS PEQUENOS CONTRUÍDOS COM AS DIMENSÕES CALCULADAS SEGUNDO O ESTUDO DE IRWIN .....	34

FIGURA 4.11- DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE TOMADA DE PRESSÃO NA FACE INSTRUMENTADA CO MODELO CÚBICO .....	35
FIGURA 4.12- IMAGEM DO INTERIOR DO CUBO A) E IMAGEM DA BASE DO CUBO B) .....	36
FIGURA 4.13- ESQUEMA DA DISPOSIÇÃO DOS PINÁCULOS E DOS ELEMENTOS DE RUGOSIDADE NO TÚNEL AERODINÂMICO, BEM COMO AS RESPECTIVAS DIMENSÕES EM METROS .....	37
FIGURA 4.14- CONFIGURAÇÃO DA SEÇÃO DE ESTUDO COM PINÁCULOS, ELEMENTOS DE RUGOSIDADE E MODELO CÚBICO .....	38
FIGURA 5.1- DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DO TÚNEL AERODINÂMICO .....	40
FIGURA 5.2- COEFICIENTES DE PRESSÃO ESTÁTICA DO TÚNEL DE VENTO PARA TÚNEL EM VAZIO .....	40
FIGURA 5.3- PERFIL DE VELOCIDADES OBTIDO PARA A SEÇÃO $x=0,30\text{m}$ EM TÚNEL VAZIO .....	41
FIGURA 5.4- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=2,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=2,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y EM TÚNEL VAZIO .....	41
FIGURA 5.5- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=4,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=4,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y EM TÚNEL VAZIO .....	42
FIGURA 5.6- DESENVOLVIMENTO DA ESPESSURA DA CLA AO LONGO DO TÚNEL AERODINÂMICO .....	42
FIGURA 5.7- COEFICIENTES DE PRESSÃO ESTÁTICA DO TÚNEL DE VENTO PARA TÚNEL COM ELEMENTOS DE RUGOSIDADE $k=0,05\text{m}$ .....	43
FIGURA 5.8- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=2,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=2,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,05\text{m}$ .....	44
FIGURA 5.9- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=4,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=4,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,05\text{m}$ .....	45
FIGURA 5.10- AJUSTE DE POTÊNCIA PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 4 A $x=4,10\text{m}$ .....	46
FIGURA 5.11- AJUSTE LOGARÍTMICO PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 4 A $x=4,10\text{m}$ .....	47
FIGURA 5.12- COEFICIENTES DE PRESSÃO ESTÁTICA DO TÚNEL DE VENTO PARA TÚNEL COM ELEMENTOS DE RUGOSIDADE $k=0,01\text{m}$ .....	48
FIGURA 5.13- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=2,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=2,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,01\text{m}$ E PINÁCULOS GRANDES .....	48
FIGURA 5.14- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=4,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=4,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,01\text{m}$ E PINÁCULOS GRANDES .....	49
FIGURA 5.15- AJUSTE DE POTÊNCIA PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS GRANDES A $x=4,10\text{m}$ .....	50
FIGURA 5.16- AJUSTE LOGARÍTMICO PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS GRANDES A $x=4,10\text{m}$ .....	50
FIGURA 5.17- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=2,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=2,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,01\text{m}$ E PINÁCULOS PEQUENOS .....	51
FIGURA 5.18- PERFIS DE VELOCIDADE PARA $x=4,10\text{m}$ NA LINHA CENTRAL E PARA $x=4,10\text{m}$ E AFASTADO $0,25\text{m}$ NO EIXO DO Y COM ELEMENTOS $k=0,01\text{m}$ E PINÁCULOS PEQUENOS .....	52
FIGURA 5.19- AJUSTE DE POTÊNCIA PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS PEQUENOS A $x=4,10\text{m}$ .....	52
FIGURA 5.20- AJUSTE LOGARÍTMICO PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS PEQUENOS A $x=4,10\text{m}$ .....	53
FIGURA 5.21- DESENVOLVIMENTO DOS CPS DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 4 .....	54



FIGURA 5.22- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA DIFERENTES PONTOS DE Y AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 4 .....	55
FIGURA 5.23- DESENVOLVIMENTO DOS CPS AO LONGO DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO 4 .....	56
FIGURA 5.24- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA VÁRIOS VALORES DE X NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO 4 .....	57
FIGURA 5.25- DESENVOLVIMENTO DOS CPS DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 2 COM PINÁCULOS GRANDES.....	58
FIGURA 5.26- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA DIFERENTES PONTOS DE Y AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 2 COM PINÁCULOS GRANDES.....	58
FIGURA 5.27- DESENVOLVIMENTO DOS CPS AO LONGO DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO E PINÁCULOS GRANDES.....	59
FIGURA 5.28- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA VÁRIOS VALORES DE X NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO E PINÁCULOS GRANDES .....	60
FIGURA 5.29- DESENVOLVIMENTO DOS CPS DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 2 COM PINÁCULOS PEQUENOS.....	61
FIGURA 5.30- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA DIFERENTES PONTOS DE Y AO LONGO DA SUA DISTÂNCIA HORIZONTAL, PARA TERRENO DE TIPO 2 COM PINÁCULOS PEQUENOS.....	62
FIGURA 5.31- DESENVOLVIMENTO DOS CPS AO LONGO DO PLANO DE SIMETRIA DO CUBO NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO E PINÁCULOS PEQUENOS .....	63
FIGURA 5.32- DESENVOLVIMENTO DOS CPS PARA VÁRIOS VALORES DE X NA DISTÂNCIA AO REDOR DA FACE DE BARLAVENTO PARA TERRENO TIPO E PINÁCULOS PEQUENOS.....	63
FIGURA 5.33- AJUSTE DE POTÊNCIA LINEAR E LOGARÍTMICO LINEAR, PARA $a=0,28$ .....	65
FIGURA 5.34- AJUSTE DE POTÊNCIA LINEAR E LOGARÍTMICO LINEAR, PARA $a=0,17$ .....	66
FIGURA 5.35- AJUSTE DE POTÊNCIA PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS GRANDES A $x=2,10m$ .....	66
FIGURA 5.36- AJUSTE DE POTÊNCIA LINEAR E LOGARÍTMICO LINEAR, PARA $a=0,21$ .....	67
FIGURA 5.37- AJUSTE DE POTÊNCIA PARA O PERFIL DE VELOCIDADES DE TIPO DE TERRENO 2 COM PINÁCULOS PEQUENOS A $x=2,10m$ .....	68
FIGURA 5.38- COMPARAÇÃO DOS CPS OBTIDOS PARA OS TRÊS CASOS DE ESTUDO AO LONGO DA DISTÂNCIA HORIZONTAL DO CUBO .....	70
FIGURA 5.39- COMPARAÇÃO DOS CPS OBTIDOS PARA OS TRÊS CASOS DE ESTUDO NA DISTÂNCIA AO REDOR DO CUBO NA FACE BARLAVENTO .....	71



## Acrónimos

$\alpha$	Expoente da Lei de Potência
$A_f$	Área frontal do elemento de rugosidade normal à direção do escoamento
$A_t$	Área do chão por cada elemento de rugosidade
b	Base frontal dos pináculos
D	Espaçamento entre elementos
$D_H$	Diâmetro Hidráulico
d	Altura de deslocamento de plano base
$C_p$	Coefficiente de Pressão
$C_f$	Coefficiente de Arrastamento
$\delta$	Espessura da camada limite
h	Altura dos pináculos
K	Constante de Von Karman
k	Altura dos elementos de rugosidade
n	Inverso do expoente da lei de potência
$P_{T0}$	Pressão total fora da CLA
$P_0$	Pressão estática
$P_T$	Pressão total dentro da CLA
$P_{Et}$	Pressão estática ao longo do teto

$P_{Ep}$	Pressão estática medida no tubo de Prandtl
Re	Número de Reynolds
$\rho$	Densidade do fluido
S	Altura dos pináculos
$\tau_0$	Tensão superficial
U	Velocidade característica do escoamento
$\bar{U}(\delta)$	Velocidade média do escoamento não perturbado
$\bar{U}(z)$	Velocidade média à altura z
$\nu$	Viscosidade cinemática do fluido
z	Altura acima do solo
$z_0$	Altura de rugosidade

# Capítulo 1

## 1. Introdução

### 1.1 Motivação

Ao longo da história da humanidade a ação do vento tem vindo a demonstrar ser uma manifestação ambiental de elevada importância, condicionando o comportamento do Homem e das suas realizações. Apesar dos benefícios do vento, nomeadamente, na área das energias renováveis e na dispersão da poluição ambiental, na área da edificação e da componente estrutural dos edifícios, ventos extremos podem causar danos destrutivos. Ventos com elevada intensidade podem vir a ser prejudiciais para a segurança do ser humano, bem como causar danos materiais em infraestruturas ou proporcionar o colapso das mesmas. Todos os anos ventos fortes provocam elevados custos materiais às entidades governamentais por todo o mundo. Desta forma o impacto dos ventos na vida do ser humano e nos edifícios necessitou de ser estudado em regimes controlados como em, túnel de vento ou em simulação numérica.

Uma estrutura imersa num escoamento fica sujeita a cargas associadas à sua ação. Este facto deu origem ao aparecimento de importantes áreas científicas que se ocupam da compreensão dos movimentos atmosféricos, bem como da Aerodinâmica, como parte da Mecânica dos fluidos, procurando caracterizar e quantificar a interação entre os escoamentos de massas de ar e os corpos neles imersos.

A caracterização do vento num dado local, entendido como escoamento de uma massa de ar na camada limite atmosférica (CLA), exige um leque de conhecimento em várias vertentes, entre elas a orografia, a rugosidade local e a turbulência. Em particular, a turbulência, com características essencialmente dinâmicas, pode influenciar significativamente as cargas a que as estruturas estão sujeitas. Este facto aliado à complexidade da interação escoamento *versus* estrutura é um dos principais problemas nesta área da engenharia.

Consegue-se aproximar bastante bem o estudo da CLA em túnel de vento, nomeadamente o impacto que ela tem em estruturas para as mais variadas condições de terreno. Diferentes tipos

de terreno têm diferentes impactos nas estruturas estudadas, e por sua vez diferentes respostas no escoamento. Dai ser importante conseguir-se recriar bem o terreno pretendido, de modo a se conseguir obter a CLA esperada.

Para simulação em túnel de vento, existem duas técnicas que são frequentemente utilizadas, utilização de obstáculos passivos na secção de túnel de vento ([1], [2]) ou obstáculos ativos [3]. Ambas as abordagens serão melhor definidas no Capítulo 2. Para este estudo, o método passivo foi o utilizado. Para método passivo são vários os obstáculos utilizados, como grelhas, pináculos, paredes castelares ou elementos de rugosidade. Destes obstáculos a combinação de pináculos com elementos de rugosidade é das mais usadas. Neste trabalho escolheu-se seguir o *design* utilizado por Irwin [1], combinando pináculos *with splitter plate*, e elementos de rugosidade cúbicos. Ao se combinar este tipo de elementos passivos, tendo em atenção certas características, é possível simular vários tipos de terrenos [4].

A pesquisa realizada sobre os efeitos do vento nos edifícios tem recebido bastante atenção, e até à data vários estudos já foram publicados sobre a temática. Desta forma, no âmbito da unidade curricular de Aerodinâmica foi proposta a análise do comportamento da camada limite em regime turbulento bem como a sua interação com um edifício à escala. Para numa perspetiva de contribuir com mais uma análise de estudo para esta área, e proporcionando ao laboratório de fluidos, da Faculdade de Ciências e Tecnologias, os meios para poder continuar estudos nesta área que em bastante pode melhorar a vida quotidiana do ser humano.

## **1.2 Objetivos**

Os objetivos propostos para este estudo foram os seguintes:

1. Uso do método passivo para simular as propriedades do escoamento da CLA para um tipo de terreno 4 e 2, no túnel de vento do laboratório dos fluidos e termodinâmica da FCT-UNL.
2. Reaproveitando elementos dos rugosidade disponíveis no laboratório de fluidos, projetar e construir os pináculos, bem como um modelo cúbico que representaria um edifício.
3. Verificar o método de Irwin, comprovando que a espessura da CLA correspondia ao desejado.
4. Fazer a leitura dos coeficientes de pressão no modelo cúbico.

## **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação está organizada na seguinte sequência de capítulos.

Capítulo 1- Introdução à temática e motivação bem como os objetivos que se pretendiam alcançar com este estudo

Capítulo 2- Apresenta-se a definição de camada limite atmosférica e a caracterização dos parâmetros que descrevem o escoamento do ar no seu interior. Apresenta-se neste capítulo uma breve revisão bibliográfica sobre os estudos realizados em túnel de vento, e técnicas usadas.

Capítulo 3- Apresenta uma muito breve caracterização das principais particularidades que descrevem o escoamento em torno de um edifício tridimensional. É também introduzido o conceito de coeficiente de pressão.

Capítulo 4- Explica a instrumentação utilizada nesta experiência, bem como a fase de projeto e construção dos pináculos e do modelo cúbico. Apresenta ainda, o esquema da componente experimental.

Capítulo 5- Este capítulo contém toda a fase experimental, bem como resultados obtidos. No final do capítulo encontra-se a discussão de todos os resultados obtidos.

Capítulo 6- Resumem-se as principais conclusões e sugestões para desenvolvimento futuro.





# 2

## Capítulo 2

### 2. Revisão Bibliográfica

Os túneis de vento têm sido bastante usados ao longo dos anos para se verificar a aerodinâmica de veículos, aeronaves ou edifícios sujeitos a cargas do vento. Uma vez que no dia-a-dia estes casos se passam na camada limite atmosférica, torna-se necessário recriar bem a CLA em túnel de vento, de modo a se conseguir estudar estes casos mais ao pormenor.

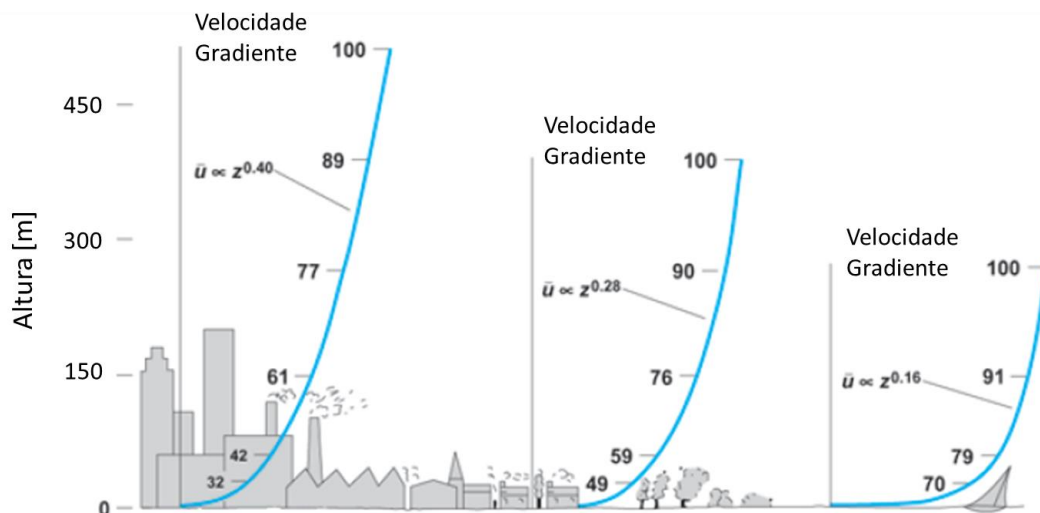
Neste capítulo, foi feita uma breve revisão bibliográfica sobre a CLA, bem como as várias maneiras de a simular em túnel de vento.

#### 2.1 Camada Limite Atmosférica

A camada limite atmosférica (CLA) é o produto do atrito que se faz sentir entre o escoamento do vento e a superfície terrestre. Nesta camada, o impacto do terreno faz-se sentir diretamente no comportamento do escoamento, podendo-se assim facilmente concluir que a velocidade média do vento não é constante em altura. À medida que a distância ao solo vai aumentando, os efeitos do atrito da superfície terrestre vão deixando de se sentir, e por consequência a velocidade média do vento tende a igualar a velocidade no topo da camada limite.

As perturbações causadas no escoamento do vento podem ser de origem natural (como montanhas ou árvores) ou de origem Humana (como edifícios). No seu conjunto são designados como rugosidade aerodinâmica do solo.

A intensidade da perturbação, no escoamento do vento provocada pela superfície terrestre reflete-se na altura da camada limite atmosférica perturbada, podendo-se assim caracterizar os diferentes tipos de terrenos consoante as perturbações em altura na CLA. Desta forma a espessura da CLA varia consoante o tipo de terreno em estudo, sendo tipicamente de 450 m para grandes cidades, de 360 m para terrenos suburbanos, 270 m para terreno rural e 210 m para mar aberto [5].



**Figura 2.1- Altura da CLA e perfil de velocidades do tipo de potência para cada tipo de terreno (imagem alterada de [6])**

A estrutura da CLA apresenta bastantes semelhanças com a estrutura simulada em túnel de vento, podendo-se verificar duas secções distintas, a *inner layer* e a *Outer Layer* (Figura 2.2).[3] A *Inner Layer* ou *Surface Layer* corresponde tipicamente a 10%-20% da espessura da CLA. Nesta secção é onde se verifica uma perturbação direta do escoamento por parte da superfície terrestre[7]. A *Inner Layer* pode ainda dividir-se na *Interfacial sublayer* e *Inercial Sublayer*, sendo que a *Interfacial sublayer* é a camada que se encontra no início da CLA, em que a sua altura corresponde à altura de deslocamento do plano base ( $d$ ). Nesta secção encontram-se todos os obstáculos que poderão perturbar o escoamento. Por sua vez a *Inercial sublayer* é a região entre a *Interfacial sublayer* e a *Outer layer*. Acima da *Inner layer* encontra-se a *Outer layer*, sendo que nesta camada, apesar de ainda se sentirem os efeitos da rugosidade da superfície terrestre, a sua intensidade já é bastante reduzida. Acima da *Outer layer* encontra-se a Atmosfera livre onde os efeitos da rugosidade terrestre se deixam de fazer sentir, onde se verifica uma velocidade de escoamento constante e não perturbado.

Como se verificou anteriormente a CLA está dependente da rugosidade aerodinâmica do solo que por sua vez influencia o perfil de velocidades formado. Na definição do perfil de velocidades,  $\bar{U}(z)$  (função da distância à superfície  $z$ ) torna-se necessário ter em consideração a rugosidade aerodinâmica do terreno em causa. Para a descrição matemática de  $\bar{U}(z)$  do perfil de velocidades em altura são utilizadas duas funções que definem bastante bem os perfis de velocidades da CLA, sendo estas funções do tipo de potência ou do tipo logarítmico. Esta descrição matemática do perfil de velocidades é bastante importante para tentar definir a ação do vento sobre as estruturas, sempre que a altura das mesmas possa influenciar o tipo de escoamento.

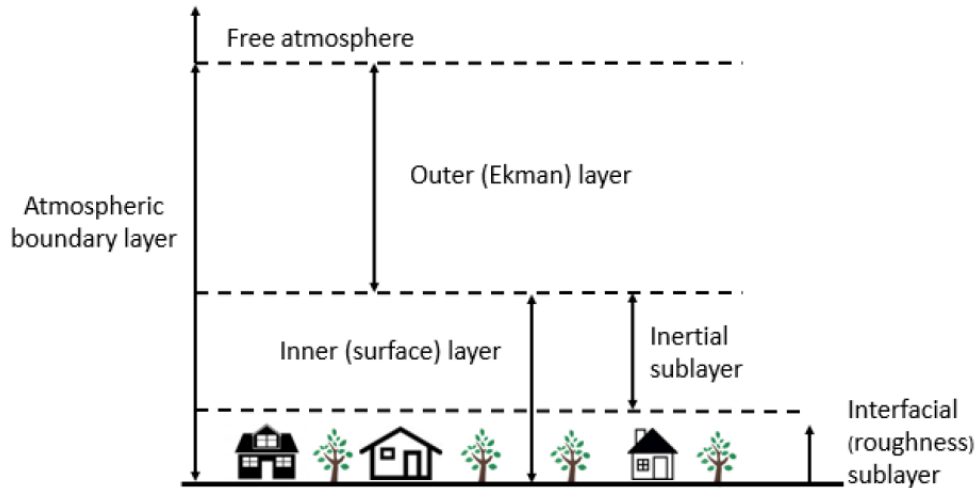


Figura 2.2- Esquema da Camada Limite Atmosférica [8]

### Perfil de Velocidades Médias

Um parâmetro que ajuda bastante a entender o que se passa na CLA é o perfil de velocidades médias, sendo o perfil construído com a variação das velocidades ao longo da direção vertical. Para definir este perfil, duas leis apresentam formulações capazes de descrever com bastante rigor o comportamento da CLA, sendo estas a Lei de Potência e a Lei Logarítmica.

#### Lei de Potência

A Lei de Potência é uma lei bastante usada para descrever o perfil médio de velocidades ao longo da sua altura. A sua formulação é descrita por:

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

Onde:

$\bar{U}(\delta)$ - velocidade média do escoamento não perturbado;

$\delta$ - espessura da camada limite, (valor de  $z$ , onde se atinge  $\bar{U}(z)/\bar{U}(\delta) \approx 0.99$ );

$n$ - inverso do expoente da lei de potência.

Esta lei é uma lei empírica, ou seja não tem justificação teórica. No entanto é usada com bastante frequência para calcular a variação da velocidade média dos perfis de velocidade, pois através dela é possível ter uma ideia bastante aproximada da estrutura global da camada limite, no que diz respeito aos valores médios da velocidade. Na sua formulação tem ainda a vantagem de ter apenas uma incógnita na formulação, sendo esta o valor de  $n$ , tornando-se assim uma fórmula bastante prática de se usar em contexto de engenharia. O valor  $n$  é tido como uma importante referência, pois permite associar o respetivo perfil a uma dada categoria de terreno. De notar ainda

que o expoente da lei de potência, dependendo da literatura, pode aparecer representado com a letra grega  $\alpha$ , ou seja,  $1/n = \alpha$ .

Deste modo, numa tentativa de tabelar os vários tipos de terrenos existentes, bem como associá-los a um valor de  $n$ , Davenport [9] procedeu à análise dos perfis de velocidade de 19 tipos de terrenos, onde posteriormente os agrupou em 8 categorias, estando estes representados na tabela 2.1.

**Tabela 2.1- Tipos de terrenos agrupados através da sua rugosidade aerodinâmica segundo Davenport [9]**

<b>Categoria</b>	<b>Descrição do Terreno</b>	<b>n</b>
<b>1</b>	Zonas com pouca rugosidade Ex: grandes extensões de água	8.5
<b>2</b>	Zonas planas com poucos obstáculos Ex: Desertos	7.5
<b>3</b>	Zonas planas com algumas colinas e com reduzido número de obstáculos Ex: Terrenos de cultivo com algumas casas e árvores bastante dispersas	6.5
<b>4</b>	Zonas de terreno com colinas ligeiramente mais acentuadas, ou terreno plano com alguns obstáculos e barreiras Ex: Terreno aberto com paredes, casas e árvores dispersas	5.5
<b>5</b>	Zonas de terreno com colinas mais acentuadas ou terreno plano com mais obstáculos de vários tamanhos Ex: Aglomerados de árvores espaçados	4.5
<b>6</b>	Zonas de terreno plano, uniformemente cobertos com vários obstáculos Ex: Florestas	3.5
<b>7</b>	Zonas com grandes obstáculos Ex: Cidades ou subúrbios	3
<b>8</b>	Zonas com obstáculos extremamente grandes Ex: Centro de grandes cidades	2.5-1.5

Estas 8 categorias de terrenos enumerados por Davenport, poderão ser ainda reagrupadas em 4 tipos de terrenos, como se vê frequentemente em literatura mais recente. Na tabela (2.2), encontram-se os valores de  $\alpha$  para cada tipo de terreno segundo Dyrbye and Hansen [10] (\*) e segundo a VDI guideline 3783 [11] (\*\*).

**Tabela 2.2 - Diferentes tipos de terreno e seu respectivo  $\alpha$  segundo Dyrbye and Hansen [10] e a VDI guideline 3783 [11].**

Tipo de Terreno.	$\alpha$ (*)	$\alpha$ (**)
Tipo I. Zona costeira, lagos ou terrenos lisos e planos com pouca vegetação e sem obstáculos.	0.12	0.08 - 0.12
Tipo II. Terreno com pouca vegetação como relva ou obstáculos isolados (árvores, edifícios) onde a distância entre obstáculos presente no mínimo 20 vezes a altura do obstáculo.	0.16	0.12 - 0.18
Tipo III. Terreno com vegetação regular, edifícios, ou obstáculos em que a distância entre eles tenha no máximo 20 vezes a sua altura (como aldeias, terreno suburbano, floresta densa)	0.22	0.18 - 0.24
Tipo IV. Terreno onde pelo menos 15% da sua superfície está coberta de edifícios e a sua altura média seja superior a 15m.	0.30	0.24 – 0.40

### Lei Logarítmica

A lei Logarítmica é dada por:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z-d}{z_0} \quad (2.2)$$

Onde:

$\bar{U}(z)$ - velocidade média à altura  $z$

$u^*$ - velocidade de atrito, que é dado por  $\sqrt{\tau_0/\rho}$ , em que  $\tau_0$  é a tensão de arrastamento superficial (tensão exercida pelo ar na superfície do terreno) e  $\rho$  é a massa específica do fluido;

$K$ - constante de Von Karman  $\approx 0,4$ ;

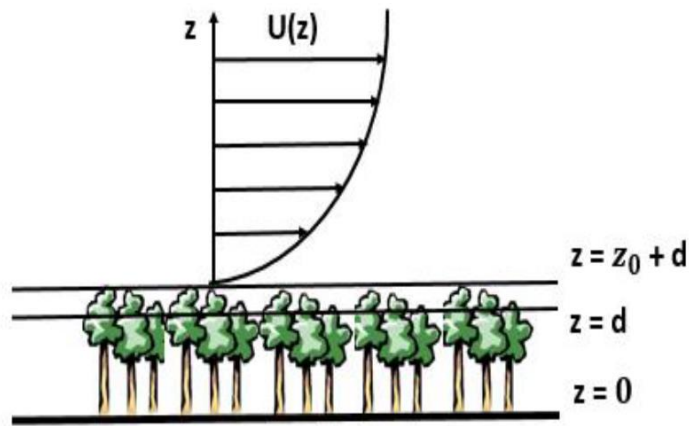
$d$ - altura de deslocamento do plano base, que tem em consideração a obstrução provocada no escoamento, segundo  $z$ , pelo conjunto dos elementos de rugosidade [m];

$z_0$ - altura de rugosidade [m].

$z$ - altura acima do solo [m]

$z_0$  representa a altura de rugosidade, ou seja, é a altura acima do chão onde a velocidade média do escoamento é zero devido aos efeitos da rugosidade. Como por exemplo, na presença de um terreno tipo floresta, que é um terreno bastante denso. Assim a altura de deslocamento do plano

base,  $d$ , tem de ser considerada na alteração do perfil médio das velocidades, assim irá verificar-se uma alteração no escoamento e o topo das árvores passará a contar como a altura base do terreno. (Figura 2.2)[8],[10].



**Figura 2.3- Perfil de velocidades médias logarítmico [8]**

As medições de  $z_0$  foram realizadas em vários tipos de terrenos, chegando-se assim aos valores presentes nas várias normas, como por exemplo o Eurocódigo [4], e a VDI guideline 3783 [11] e a relação dos valores de  $z_0$  com o respetivo terreno encontram-se representados na tabela (2.3).

**Tabela 2.3- Valores de  $z_0$  segundo a norma VDI guideline 3783 (\*) e segundo o Eurocódigo (\*\*)**

Tipo de Terreno.	$z_0$ [m] (*)	$z_0$ [m] (**)
Tipo I. Zona costeira, lagos ou terrenos lisos e planos com pouca vegetação e sem obstáculos.	$10^{-5} - 0.005$	0.01
Tipo II. Terreno com pouca vegetação como relva ou obstáculos isolados (árvores, edifícios) onde a distância entre obstáculos presente no mínimo 20 vezes a altura do obstáculo.	$0.005 - 0.1$	0.05
Tipo III. Terreno com vegetação regular, edifícios, ou obstáculos em que a distância entre eles tenha no máximo 20 vezes a sua altura (como aldeias, terreno suburbano, floresta densa)	$0.1 - 0.5$	0.3
Tipo IV. Terreno onde pelo menos 15% da sua superfície está coberta de edifícios e a sua altura média seja superior a 15m.	$0.5 - 2$	1

No entanto na simulação em túnel de vento, especialmente usando o método de pináculos em conjunto com elementos de rugosidade, o tamanho, a densidade e a disposição dos elementos

no túnel de vento pode variar, o que por sua vez pode afetar os valores da altura de rugosidade. Desta forma, Lettau [12] demonstrou, que se tanto o tamanho como o distanciamento entre elementos de rugosidade fosse uniforme, o valor da altura de rugosidade poderia ser previsto pela seguinte fórmula:

$$\frac{z_0}{k} = 0.5 \frac{A_f}{A_t} \quad (2.3)$$

Onde:

$z_0$ - Altura de rugosidade

$k$ - Altura do elemento de rugosidade

$A_f$ - Área frontal do elemento de rugosidade, normal à direção do escoamento

$A_t$ - Área do chão por cada elemento de rugosidade

Segundo a literatura os valores das velocidades médias do escoamento, usando a lei logarítmica, são mais próximos dos teóricos comparativamente à lei de potência, na zona inferior da camada limite, cerca de 10 a 20% da espessura da camada limite[1],[7]. No entanto a lei logarítmica apresenta algumas falhas matemáticas que podem impedir a avaliação dos resultados. Nomeadamente, o facto de o logaritmo de números negativos não existir, logo não se consegue avaliar alturas  $z$  abaixo da altura de deslocamento do plano base ( $d$ ), sendo ainda que se  $(z - d)$  for menor que  $z_0$  o valor da velocidade vai ser negativa [13]. Para além dos factos enumerados anteriormente, a lei logarítmica deixa de ser válida para alturas muito acima do chão, sendo que a altura até à qual se costuma usar esta lei é até aos 200m acima do chão, como enunciado no Eurocódigo [4],[10]. Tendo isto em consideração a lei de potência costuma ser mais aplicada no ponto de vista de engenharia, uma vez que apesar de não representar tão bem o perfil de velocidades médias para as zonas inferiores da CLA, aproxima-se bastante bem do desejado, tendo ainda a vantagem de apresentar apenas uma variável desconhecida ( $\alpha$ ) em comparação à lei logarítmica que apresenta 3 variáveis desconhecidas ( $z$ ;  $\tau_0$ ;  $\rho$ ), dificultando assim a aplicação da mesma [13].

## 2.2 Simulação da Camada Limite em Túnel de Vento

Devido à curiosidade de se entender os fenómenos que atuam no quotidiano sentiu-se a necessidade de simular a CLA. Dai se recorrer, frequentemente, ao auxílio de túneis de vento para esta simulação. Esta pode ser realizada tanto por formação natural CLA, como por formação forçada, ou seja com o auxílio de obstáculos gerados pelo Homem.

Normalmente consegue-se formar uma CLA, de forma natural, com uma espessura entre 0.5-1.0 m, mas para tal é necessário uma superfície rugosa com 20-30 m de comprimento.[8] O facto de ser necessário uma secção de teste tão grande torna a simulação da CLA de origem natural, bastante difícil de se concretizar em túnel de vento, pois tal implica túneis com elevado comprimento, o que é bastante mais dispendioso para as instituições que realizam estes estudos.

Desta forma recorre-se frequentemente ao auxílio de obstáculos, por forma a gerar uma CLA num menor comprimento da soleira do túnel. [2] Sendo que se pode subdividir este tipo de simulação em dois métodos, o método passivo e o método ativo, dependendo apenas se os objetos utilizados são controláveis à distância ou não. Tendo isto em consideração procedeu-se à análise destes dois métodos:

### Método passivo

A simulação em túnel de vento recorrendo ao método passivo, consiste na utilização de obstáculos que permitem assim criar uma maior espessura de CLA, para um comprimento de túnel de vento mais reduzido. Estes obstáculos podem ser, grelhas, placas, pináculos, elementos de rugosidade ou barreiras castelares. Com o auxílio destes obstáculos, não só se consegue reduzir, o espaço de teste necessário, como se consegue recriar certas características turbulentas ao escoamento (*eddie*), como se verifica na natureza. De notar que estes tipos de obstáculos não requerem qualquer tipo de intervenção Humana a quando da realização das experiências.

Em 1957, Owen e Zienkiewicz,[14] realizaram um estudo recorrendo ao auxílio de barras em paralelo com distanciamento variado, recriando uma grelha, por forma a tentar criar um *shear flow* uniforme. O objetivo deste estudo era impor uma resistência ao escoamento de modo a produzir uma variação linear na pressão total, a jusante da grelha.

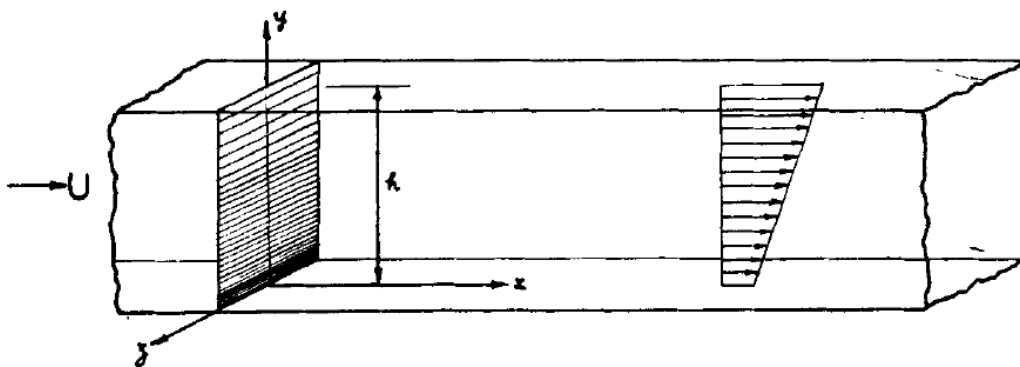
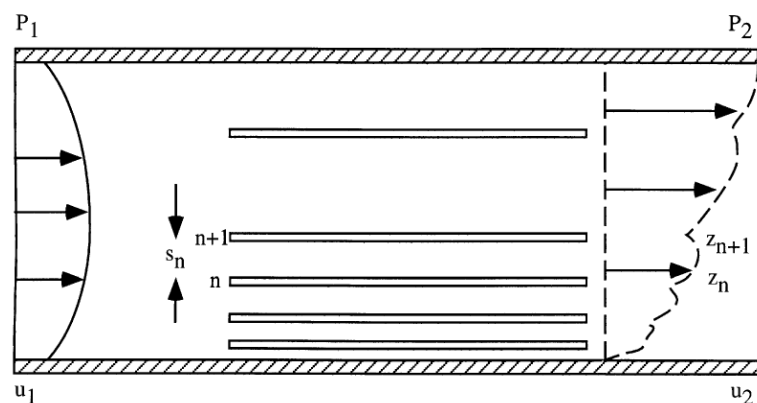


Figura 2.4- Experiência de Owen e Zienkiewicz [14]

Em 1999, Phillips et al [6], realizaram um estudo semelhante, onde o objetivo era mais uma vez recriar em túnel de vento uma *shear flow* linear, mas neste caso em vez de barras foram usadas placas paralelas entre si, com 0 incidência. Onde se variou o espaçamento entre as placas bem como o seu comprimento, por forma a obter as condições desejadas no escoamento. Este tipo de estudo gerando uma *Shear flow* linear de baixa turbulência é bastante vantajoso para testar resultados obtidos por simulação numérica, bem como a calibração de equipamento.





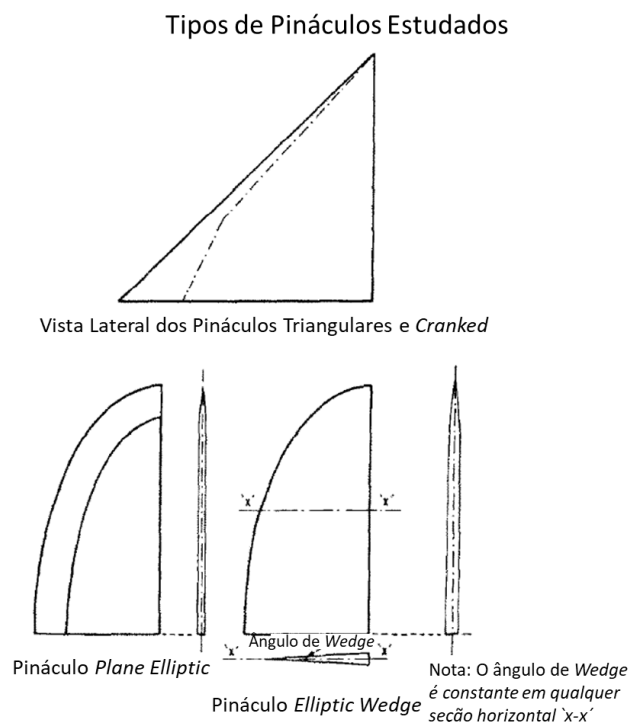
**Figura 2.5- Arranjo da experiência de Phillips et al. [6]**

No entanto nenhum dos estudos anteriores tem em consideração a geração de camada limite em regime turbulento, para tal é necessário adicionar geradores de turbulência.

Neste tipo de estudo, o uso de elementos de rugosidade, é bastante utilizado. Em 1972, Wooding et al., [15] fizeram comparação de vários estudos, para elevados números de Reynolds, com elementos de rugosidade de várias formas. Através da adimensionalização de várias dimensões (altura dos elementos, área dos elementos, concentração dos elementos, etc.) que definem os vários elementos de rugosidade, formularam uma lei de atrito, que define bem o escoamento independentemente da forma do elemento que se use.

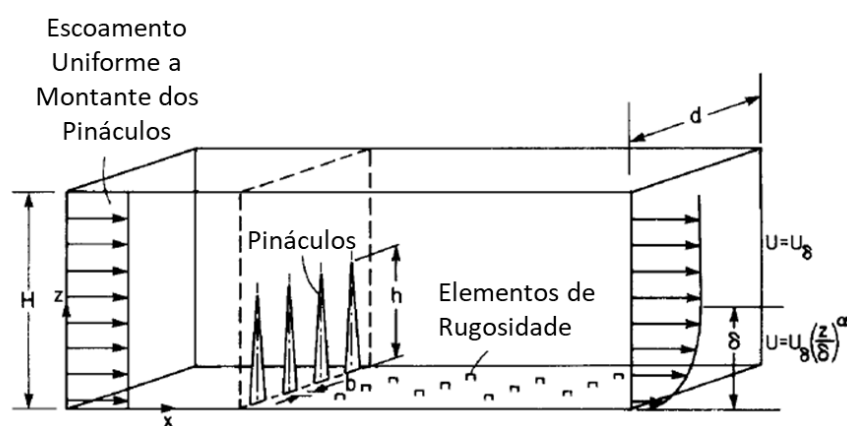
Ao longo da literatura sobre a temática, não se pode deixar de notar que a vasta maioria dos estudos realizados, para gerar uma Camada Limite em regime turbulento, recorre à combinação de elementos de rugosidade com pináculos. Isto porque os pináculos atuam como geradores de turbulência, e variando a forma e a altura dos mesmos, pode-se controlar a intensidade de turbulência que se tem no escoamento a jusante, bem como a velocidade do mesmo. Os elementos de rugosidade, são usados como complemento, para modificar a camada inferior da camada limite, permitindo variar as condições de terreno que se pretendem simular. [8]

Counihan [2], foi um dos pioneiros, no que toca a este assunto. Em 1969, Counihan comparou quatro tipos de geradores de turbulência, *the triangular*, *the cranked triangular*, *the plane elliptic* and *the elliptic wedges*, para estudar o tipo de camada limite que cada um gerava bem como a turbulência introduzida no escoamento. Em adição a estes tipos de geradores ainda usou elementos de rugosidade e uma barreira castelar, de modo a reproduzir o tipo de terreno que pretendia estudar. Para o túnel de vento em questão (Central Electricity Research Laboratories, CERL) a espessura de camada limite que tentaram atingir tinha 4ft ou seja aproximadamente 1.22m. Ambos os estudos se aproximaram dos dados teóricos esperados, que se baseava na simulação do tipo de terreno rural, no entanto, concluíram que os geradores *elliptic wedges* apresentavam os melhores perfis de turbulência. Concluiu-se ainda que para realizar este tipo de experiência, onde se garanta um desenvolvimento completo do escoamento, o comprimento da secção de estudos deverá ter entre 4 a 5 vezes a espessura da camada limite alvo.



**Figura 2.6-Tipos de pináculos usados por Counihan [2]**

Em 1981, Irwin,[1] melhorou o método criado por Standen [16] e criou o modelo de pináculo mais simplista, sendo estes pináculos triangular *with splitter plate*. Aliando este novo design de geradores a elementos de rugosidade em túnel de vento, Irwin concluiu que este tipo de pináculo, embora simples, gerava um perfil de velocidades médias idêntico ao teórico, onde tal também se verificaria na turbulência do escoamento, provando que o detalhe nos pináculos não tem muita importância para este tipo de estudo. Devido à geometria básica dos geradores, este método de gerar a CLA em túnel de vento, passou a ser um dos mais usados até à data.



**Figura 2.7-Esquema da experiência de Irwin (imagem baseada de [1]).**

Bastantes estudos se seguiram nos anos seguintes, onde se baseiam no tipo de pináculos tanto de Irwin como de Counihan, reforçando ainda mais os seus trabalhos. Alguns destes estudos encontram-se na tabela 2.4.

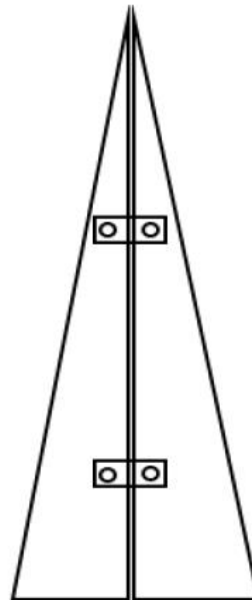
**Tabela 2.4- Tabela resumo com algumas publicações com junção de pináculos e elementos de rugosidade, onde S é a altura dos pináculos (tabela baseada de [17]).**

Publicações	Tipo de Pináculos	Dimensões dos Pináculos					Dimensões do Túnel de vento		Comprimento de estudo
		Largura	<i>Streamwise depth</i>	<i>Semi-wedge angle</i>	Espaçamento entre pináculos	Altura	Largura		
Armitt e Counihan 1968 [18]	Triangular	-	-	-	S	1.25 S	3.75 S	0.50 S, S, 1.50 S e 3.125 S	
Counihan 1969 [2]	Triangular, <i>plane-elliptic</i> e <i>quarter-elliptic wedge</i>	-	0.50 S	5°, 6°	0.50 S	1.22 S	4 S	3 S e 4, 5 S	
Counihan at al. 1974 [19]	<i>Quarter-elliptic wedge</i>	-	0.50 S	6°	0.50 S	1.22 S	4 S	4.50 S	
Standen 1972 [16]	Triangular	0.07 S	0.14 S	-	0.25 S	S	S	-	
Cook 1978 [20]	<i>Quarter-elliptic wedge</i>	-	0.50 S	5.7°	-	1.25 S	2.50 S	7.50 S	
Castro 1979 [21]	<i>Quarter-elliptic wedge</i>	-	-	-	-	5.30 S	6.15 S	50 S	
Irwin 1981 [1]	Triangular <i>with splitter plate</i>	0.076 H, 0.146 H, 0.161 H	-	-	0.50 S	H	H	4.50 S; 6 S	

Publicações	Tipo de Pináculos	Dimensões dos Pináculos				Dimensões do Túnel de vento		Comprimento de estudo
		Largura	<i>Streamwise depth</i>	<i>Semi-wedge angle</i>	Espaçamento entre pináculos	Altura	Largura	
Robert N. Meroney et	Triangular <i>with splitter plate</i>	0.164 S	0.23 S	-	0.50 S	1.33 S	2 S	-
Pavageau e Schatzmann 1999 [23]	Triangular <i>with splitter plate</i>	-	-	-	0.50 S	1.33 S	2 S	11.7 S
Farrell e Iyengar 1999 [24]	Triangular e <i>quarter-elliptic wedge</i>	-	-	-	-	1.50 S	1.40 S	10.2 S
Iyengar e Farrell 2001 [25]	<i>Quarter elliptic wedge</i>	-	0.60 S	6°	-	1.50 S	1.42 S	10.2 S
		-	0.30 S	6°	-	3 S	2.83 S	10.3 S
Balendra et al 2002 [26]	<i>Quarter elliptic wedge</i>	0.11 S	-	6°	0.50 S	1.92 S	2.40 S	
Hamoud et al. 2010 [27]	Triangular <i>with splitter plate</i>	0.17 S	-	-	0.50 S	1.50 S	1.50 S	5.40 S
Kozmar 2012 [28]	<i>Quarter elliptic wedge</i>	0.11 S	0.50 S	6°	0.50 S	1.80 S	2.70 S	8.70 S
Hohman et al. 2015 [29]	<i>Quarter elliptic wedge</i>	-	-	6°	0.60 S, 0.30 S	1.60 S	2.40 S	7.90 S

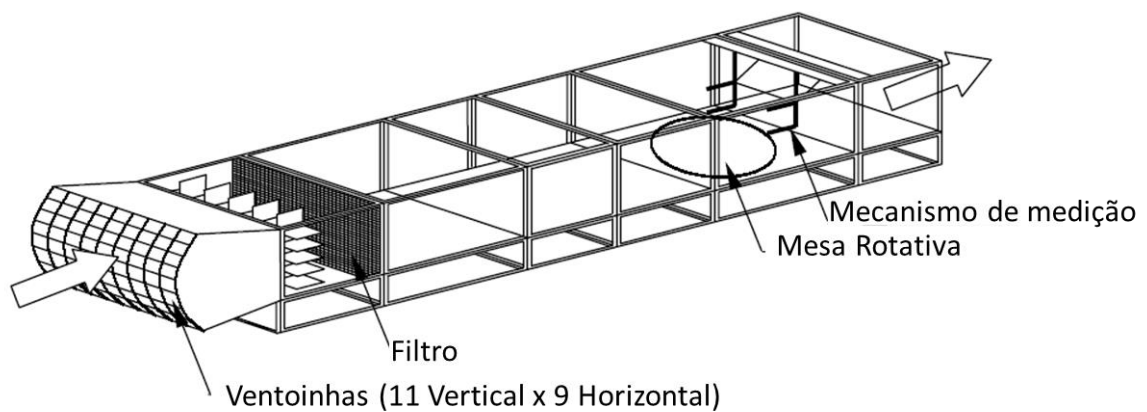
### Método Ativo

A simulação de métodos ativos consiste na introdução de energia mecânica a certas frequências no escoamento [3][30], que por sua vez permitem ajustar as velocidades médias do escoamento, bem como a intensidade de turbulência que se pretende gerar. Para tal podemos ter introdução de energia mecânica no escoamento por parte dos pináculos, tornando-os oscilantes como Pang e Lin em 2008 [31] ou usando um sistema de várias turbinas, para introduzir os efeitos desejados no escoamento como Cao et al, 2002 [32] e Aly Mousaad Aly, 2014 [33]. A simulação recorrendo ao método ativo requer bastante controlo tecnológico, como, reguladores da frequência de vibração para o caso dos pináculos oscilantes, ou o ajuste independente de cada turbina de modo a garantir a velocidade desejada ao escoamento. Esta componente tecnológica, acaba por ser bastante dispendiosa para as instituições que realizam este tipo de investigação.



**Figura 2.8- Tipo de Pináculo utilizado por Pang e Lin [45]**

Pang e Lin, em 2008 [45], criaram assim um tipo de pináculo que era capaz de oscilar, podendo estes ser controlados remotamente, aliando ainda elementos de rugosidade. Pang e Lin agarraram num *design* de pináculo já conhecido o triangular *with splitter plate*, e dividiram-nos ao meio em dois pedaços simétricos, unindo-os posteriormente com dobradiças. Com as duas partes do pináculo era possível criar movimento para jusante do escoamento controlando remotamente com um computador. Estes movimentos adicionavam energia ao escoamento a uma frequência controlada, onde ao mesmo tempo este tipo de gerador funcionava também como gerador passivo, aliando assim os dois métodos. Com os resultados conseguiu-se concluir que este tipo de pináculos melhora ligeiramente a turbulência no escoamento, mas comparado com a turbulência que se verifica na natureza ainda está bastante longe do pretendido.



**Figura 2.9- Esquema do sistema de turbinas de Cao (imagem baseada de [32]).**

Em 2002 Cao et al, [32] utilizou um sistema composto por 99 turbinas, organizadas em 11 filas com 9 turbinas por fila, cada turbina era controlada remotamente através de um computador. Onde ao mesmo tempo, usando a técnica de anemometria de fio quente, se monitorizava o escoamento e a sua respetiva turbulência a jusante das turbinas. Os resultados desta técnica, demonstraram que tanto as velocidades de escoamento como os índices de turbulência se aproximavam bastante bem dos valores alvo, tornando este método ativo uma escolha viável para a simulação de CLA em túnel de vento.

Comparando assim o método de simulação ativa com o método de simulação passiva, pode-se concluir que o método ativo simula melhor a CLA em túnel de vento, mas os seus custos tecnológicos são bastante mais elevados. E tendo em conta que vários estudos comprovam que os métodos passivos se aproximam bastante bem dos valores desejados tanto para a turbulência do escoamento bem como as velocidades médias do escoamento, para este estudo decidiu-se escolher então o método passivo, mais especificamente o *design* de pináculos proposto por Irwin [1].



## Capítulo 3

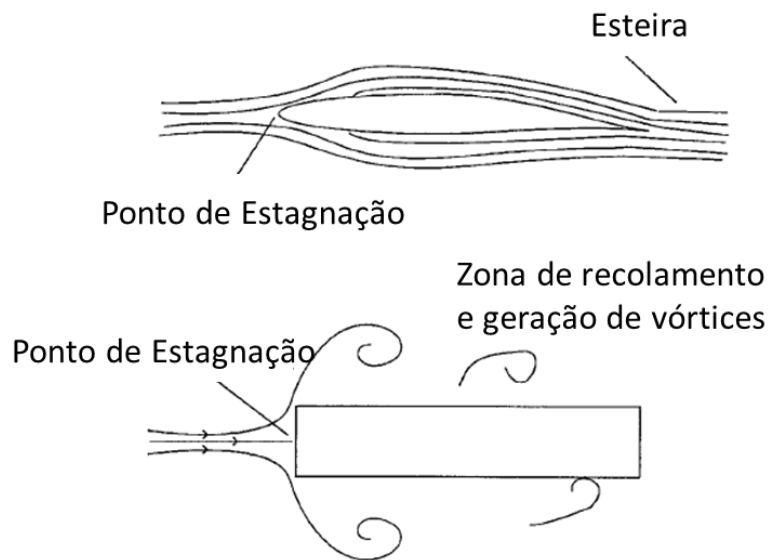
### 3. Escoamento do vento em torno de edifícios

O escoamento do vento ao encontrar um obstáculo tem tendência a contorná-lo. Um tipo de estudo interessante para a área de aerodinâmica é o escoamento em torno de *bluff bodies*, termo inglês utilizado para denominar corpos achatados ou em regra com uma grande dimensão na direção perpendicular à do escoamento, onde se pode englobar edifícios, como alvo de estudo.

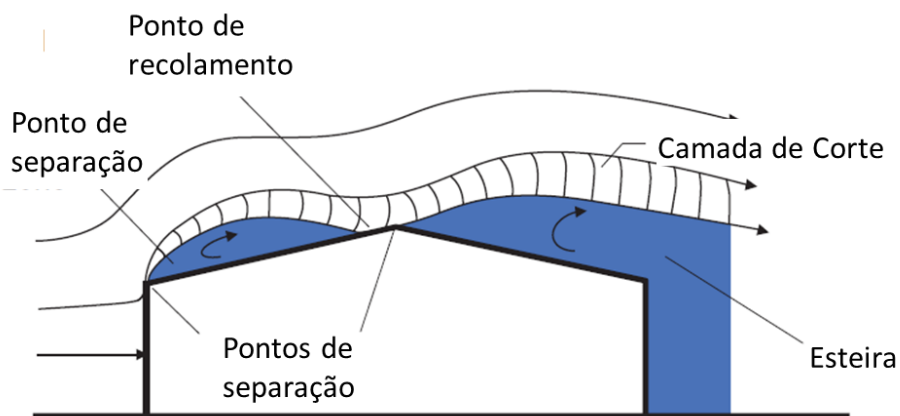
#### 3.1 Características do escoamento

O comportamento observado no escoamento varia consoante o tipo de obstáculo que ele atravessa. Por exemplo o escoamento em torno de um obstáculo aerodinâmico, como uma asa de avião, as linhas de corrente aproximam-se relativamente bem a forma da sua secção, já no caso de obstáculos menos aerodinâmicos, como edifícios, tal já não acontece bem assim. O escoamento em torno de uma secção retangular (Figura 3.1), sofre separação nas arestas vivas da secção, que por sua vez gera zonas de recirculação e formação de vórtices.

A separação do escoamento ocorre quando a energia cinética das partículas do fluido deixa de ser suficiente para contrariar as pressões que se fazem sentir na direção do fluido, criando assim um gradiente de pressão adverso. Naquela região o escoamento começa a inverter, ou seja, o fenómeno de separação começou a ocorrer. Depois de ocorrer a separação duas zonas são formadas, uma zona exterior, onde o escoamento segue sem ser afetado e uma zona interior junto às faces de secção com elevadas características de corte e vorticidade. Nestas zonas de corte (*shear layers*) é onde se formam vórtices que acabam por seguir com o escoamento para trás da secção. Estes vórtices ao encontrar pontos de separação, como cantos, criam elevadas zonas de sucção, o que pode conduzir ao recolamento do escoamento, na Figura 3.2 pode-se verificar estes mesmos fenómenos.



**Figura 3.1-Escoamento sobre *Bluff bodies***



**Figura 3.2- Zona de separação do descolamento com recolamento**

A interação do escoamento do ar com os edifícios é definido através de forças viscosas. Estas forças podem ser definidas pelo parâmetro a dimensional Número de Reynolds.

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (3.1)$$

Onde:

D- dimensão característica do objeto

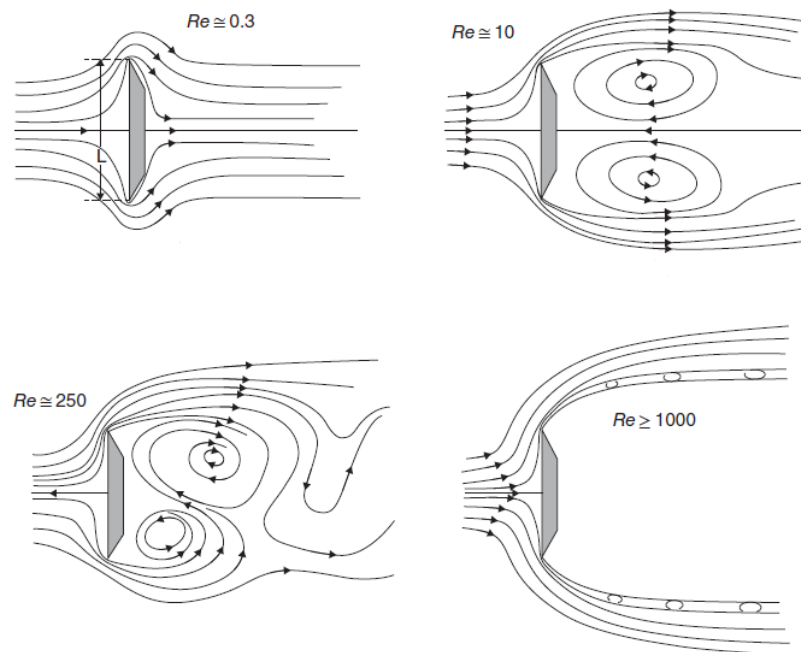
U- velocidade característica do escoamento

$\nu$ - viscosidade cinemática do fluido (no caso do ar 20°C é  $1.51 \times 10^{-5} m^2/s$ )



Uma maneira de entender o comportamento do escoamento para os diferentes valores de Reynolds está representada na Figura 3.3, como se pode reparar para valores de Reynolds baixos  $\approx 0.3$ , o fluido comporta-se como um fluido não viscoso, contornado as arestas vivas da placa sem gerar vórtices. Para valores de Reynolds ligeiramente maiores ( $Re \approx 10$ ) o escoamento sofre separação nas arestas vivas da placa, e cria duas zonas de recirculação na zona a jusante da placa. Para valores de Reynolds ainda maiores a simetria do escoamento é interrompida e passa a haver geração de vórtices que seguem com o escoamento a jusante da placa. Por fim para valores de Reynolds  $> 1000$  as forças de inércia tomam um papel mais predominante, impedindo a formação de vórtices. Existindo apenas a formação de pequenos vórtices na *shear layer* do escoamento.

Com isto facilmente se conclui que para baixos valores de Reynolds as forças viscosas são mais predominantes no escoamento e com o aumento do número de Reynolds as forças de inércia passam a desempenhar um papel mais ativo no comportamento do escoamento.



**Figura 3.3- Escoamento em torno de uma placa para diferentes valores de Reynolds**

### **Flutuações induzidas pelo Obstáculo e formação de turbilhões**

Como foi explicado anteriormente o Número de Reynolds é bastante importante para definir o comportamento que o escoamento está a ter. A partir de um certo valor de Reynolds ocorre um fenómeno de separação com algum interesse científico e que é bastante comum em escoamentos em tornos de edifícios. Os vórtices ao serem gerados pela separação do escoamento passam a formar-se alternadamente e com uma frequência bem definida. Daqui podem resultar dois casos, o caso de separação de vórtices aleatório ou separação alternada e coordenada. O último caso no contexto de aerodinâmica é apelidado de estradas de *Von Karman*.

### 3.2 Coeficientes de Pressão

Na tentativa natural do escoamento do ar contornar um obstáculo, parte da sua energia cinética é convertida em energia de pressão que está a ser exercida sobre o obstáculo. Quando toda a energia cinética é convertida em energia de pressão, ou seja,  $U$  é igual a zero, nessa zona formou-se um ponto de estagnação. A quantização destas forças pode ser feita pelo parâmetro a dimensional coeficiente de pressão:

$$C_p = \frac{p_s - p_0}{\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2} \quad (3.2)$$

Onde:

$p_s$ - pressão que atua num ponto à superfície do obstáculo

$p_0$ - pressão estática num ponto não perturbado do escoamento

$\frac{1}{2}\rho\bar{U}^2$ - pressão dinâmica do vento não perturbado pelo obstáculo à altura de referência, que é tomada por convenção como a altura do obstáculo.

# 4

## Capítulo 4

### 4. Componente Experimental

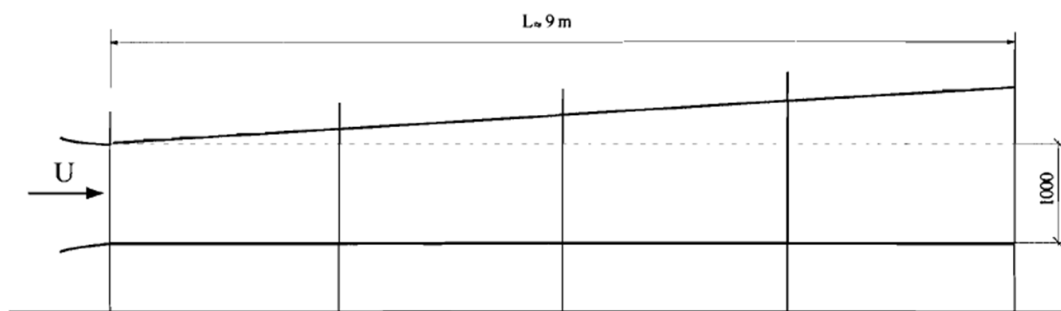
Neste capítulo é definida a instrumentação utilizada na realização das experiências, bem como a fase de projeto e construção dos pináculos e modelo cúbico.

#### 4.1 Equipamento e Instrumentação

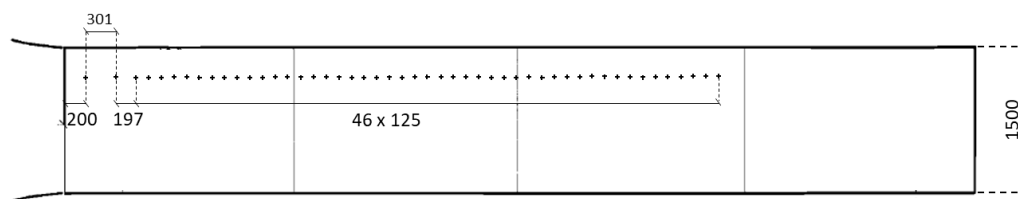
Neste estudo foi usado o túnel aerodinâmico instalado no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada, da FCT-UNL. Este túnel apresenta uma câmara de experiências de 9m e funciona em circuito fechado estando munido de três ventiladores em paralelo, sendo cada um acionado independentemente dos restantes a partir de um quadro elétrico de comando. Cada ventilador está diretamente acoplado a um motor assíncrono de 15 kW, onde dois ventiladores têm dois regimes fixos de funcionamento, 722 ou 1460 rpm. O terceiro ventilador, o ventilador central, é regulado através de um conversor de frequência que está integrado no circuito elétrico de alimentação, possibilitando assim regular a velocidade do ar, continuamente, entre 0 e 30m/s [7].

A câmara de experiências, Figura 4.1, tem uma secção transversal retangular de  $1.5 \times 1 \text{ m}^2$  à entrada. Para controlo e acesso à zona interior da câmara de experiências as paredes laterais têm 8 janelas envidraçadas.

A altura da câmara, embora tendo 1m no início da secção de estudo, pode ser alterável em função da inclinação conferida ao teto, que é constituído por quatro módulos de inclinação regulável. O teto da câmara de experiências já se encontra instrumentado com tomadas de pressão estática, de modo a se poder medir a evolução da pressão estática ao longo da câmara. Estas encontram-se representadas na figura 4.1. Sabendo a evolução da pressão estática, pode-se proceder assim à regulação dos módulos do teto com vista ao anulamento do gradiente longitudinal de pressão estática.



Vista lateral- Representação esquemática da estrutura modular



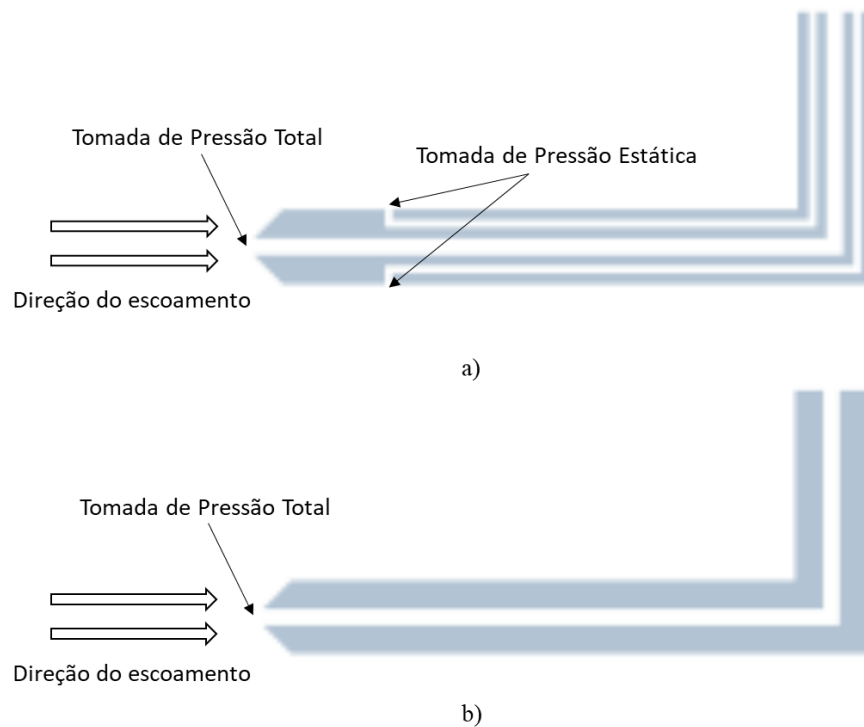
(dimensões em mm)

Planta- Distribuição das tomadas de pressão estática no teto

**Figura 4.1- Câmara de experiências do Túnel de vento da FCT-UNL**

No que toca aos instrumentos usados na realização das medições para os perfis de velocidade, recorreu-se ao uso de um tubo de Prandtl também chamado de Pitot estático, um tubo de Pitot simples, e dois micromanómetros.

O tubo de Pitot estático é constituído de dois tubos, um tubo para medir a pressão total, e outro para medir a pressão estática, que por sua vez estão conectados à tomada de pressão total e estática, respetivamente. A tomada de pressão total encontra-se ao longo do eixo do tubo, e as tomadas de pressão estáticas encontram-se na periferia do tubo, como se encontra demonstrado na figura 4.2 a). O tubo de Pitot simples, segue o mesmo princípio do tubo de Pitot estático, mas sem as tomadas de pressão estáticas. Este encontra-se representado na figura 4.2 b).



**Figura 4.2-Representação esquemática de um tubo de Pitot estático a) e de um tubo de Pitot simples b).**

A relação entre a Pressão Total do escoamento e a Pressão Estática é dada pela equação de Bernoulli, como se mostra na equação 4.1.

$$P_{Total} = P_{Estática} + P_{Dinâmica} \quad (4.1)$$

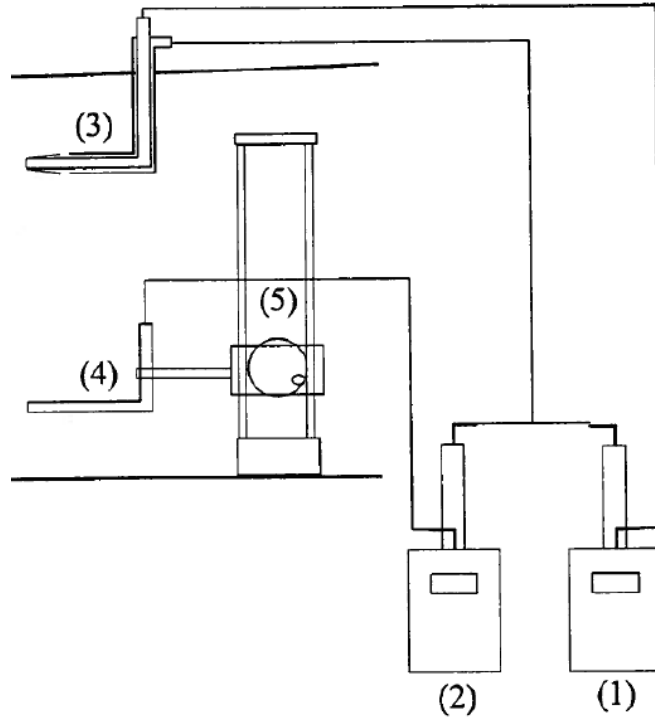
Onde  $P_{Dinâmica}$  é a pressão dinâmica do ar, que como se pode verificar pela equação 4.1 é a diferença entre a pressão total e a pressão estática. A pressão dinâmica pode ser obtida através do manómetro de Betz, ligando os tubos de pressão total e pressão estática do tubo de Pitot, à entrada positiva e negativa do manómetro respetivamente. Obtendo o valor da pressão dinâmica pode-se relacionar com a velocidade do escoamento com a equação 4.2.

$$P_{Dinâmica} = \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (4.2)$$

Onde  $\rho$  representa a densidade do ar e  $U$  a velocidade do escoamento.

Para o caso mais em concreto da experiência em estudo, na Figura 4.3 encontra-se esquematizada a montagem experimental para a medição do perfil de velocidades. Onde se tem o manómetro (1) ligado às tomadas de pressão total ( $P_{T0}$ ) e de pressão estática ( $P_0$ ) de um tubo de Pitot estático (3) colocado no exterior da camada limite. Deste modo, o manómetro (1) mede a pressão dinâmica de referência no exterior da camada limite. O tubo de Pitot simples (4), com um diâmetro exterior de 1mm, está montado num graminho de precisão (5) que permite o seu deslocamento vertical. O manómetro (2) está ligado ao tubo de Pitot simples ( $P_T$ ) e à tomada de pressão

estática do tubo de Pitot estático ( $P_0$ ). A pressão estática  $P_0$  é supostamente igual em toda a secção do túnel, depois de se ajustar os módulos do teto da câmara de experiências. Assim, o manómetro (2) mede a pressão dinâmica no interior da camada limite, à cota  $z$  em que o tubo está posicionado.



**Figura 4.3- Montagem Experimental para medição do perfil de velocidades**

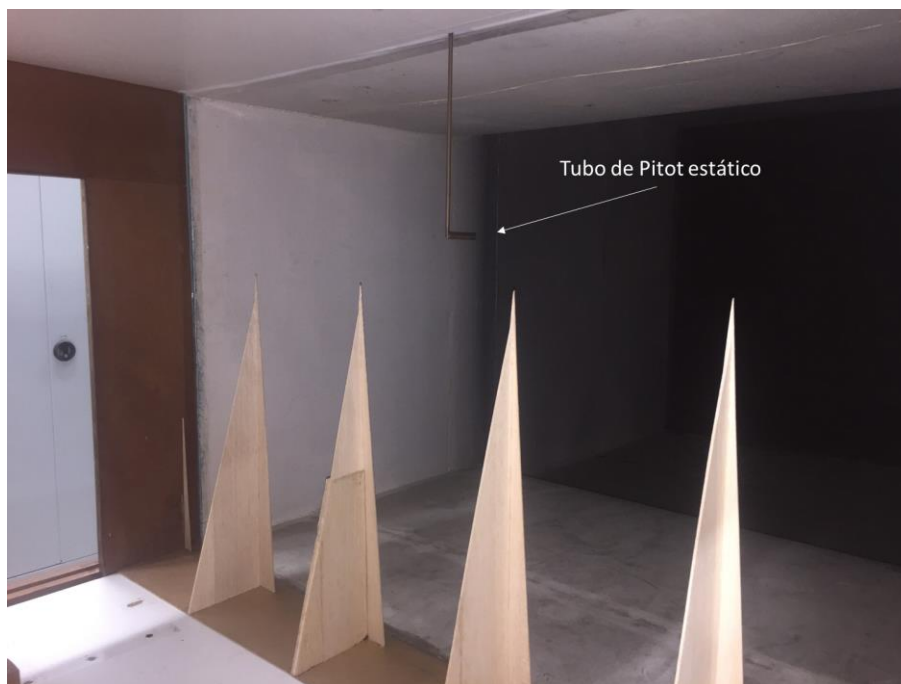
Com o auxílio das equações 4.1 e 4.2 pode-se assim definir a Pressão Dinâmica no exterior da camada limite:

$$P_{T0} - P_0 = \frac{1}{2} \rho \bar{U}_0^2 \quad (4.3)$$

Bem como Pressão Dinâmica no interior da camada limite:

$$P_T - P_0 = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 \quad (4.4)$$

O principal objetivo do tubo de Pitot estático é monitorizar a velocidade a que o escoamento se encontra no túnel de vento. Este encontra-se instalado a 700 mm acima do chão do túnel de vento ao longo da linha central do túnel e a montante da secção de testes, e encontra-se localizado antes dos obstáculos introduzidos no túnel de vento, por forma a não ser influenciado pelas experiências em curso, como demonstrado na figura 4.13.



**Figura 4.4- Localização do tubo de Pitot estático no túnel aerodinâmico**



**Figura 4.5- Imagem do manómetro Betz2500 utilizado nas medições**

## **4.2 Técnica Experimental de Simulação de CLA**

Como foi referido anteriormente na revisão bibliográfica, existem vários métodos de simular a CLA em túnel de vento. Os métodos de simulação passiva são os mais recorrentes, pois

aliam os bons resultados experimentais, ao facto de ser um tipo de simulação muito menos dispendiosa. Para este estudo decidiu-se recorrer, ao método de simulação já bastante comprovado experimentalmente, sendo este o método de Irwin[1]. Este método consiste na combinação de pináculos triangulares *with splitter plate* com elementos de rugosidade. Os pináculos atuam como geradores de vorticidade, enquanto os elementos de rugosidade são usados para melhorar o comportamento da CLA junto ao chão do túnel.

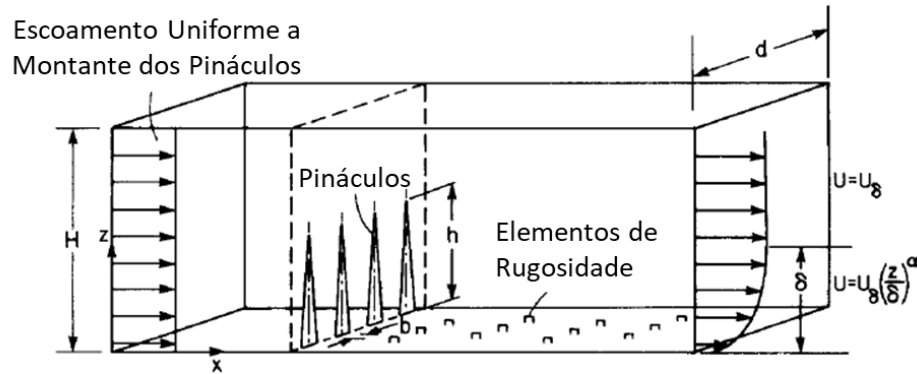


Figura 4.6- Disposição dos elementos segundo Irwin para a criação da CLA [1]

#### 4.2.1 Construção dos Pináculos

Baseando-nos na literatura do capítulo 2, decidiu-se adotar um método de simulação de CLA em túnel de vento semelhante ao estudo de Irwin[1]. Neste estudo Irwin, através de vários ensaios experimentais relacionou as dimensões dos pináculos com as dimensões dos elementos de rugosidade através de equações. Segundo este método, os pináculos devem estar no início da câmara de testes, seguindo-se dos elementos de rugosidade, como se encontra demonstrado na figura 4.6. Num sentido de aproveitar o material já existente no laboratório de Fluidos e Termodinâmica da FCT-UNL, usou-se dois tipos de elementos de rugosidade já construídos para uma tese de doutoramento[7].

Este método baseia-se na lei de potência para descrever o perfil de velocidades médias, ou seja,

$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (4.5)$$

Que como se verificou no capítulo 2, a lei de potência apresenta apenas uma incógnita ( $\alpha$ ), o que a torna bastante prática do ponto de vista experimental.

Tendo, em conta a equação (4.5), procede-se para a definição da altura dos pináculos ( $h$ ), esta pode ser obtida através da expressão (4.6). Esta relaciona a espessura da camada limite ( $\delta$ ) e o tipo de terreno em estudo ( $\alpha$ ):

$$h = \frac{1,39 \times \delta}{1 + \frac{\alpha}{2}} \quad (4.6)$$



Irwin no seu estudo inicial fixou o comprimento de estudo em  $6 * h$ , (sendo  $h$  a altura dos pináculos), mas depois de realizar as experiências, verificou que a CLA estava completamente formada à distância de  $4,5 * h$ , sugerindo assim essa alteração nos seus cálculos. Com esta nova informação pode-se reduzir num quarto o comprimento de túnel em uso, o que facilita bastante os estudos para instalações com túneis de vento mais reduzidos. Tendo isto em consideração, e tendo a altura dos pináculos já definida, pode-se definir assim a base frontal dos pináculos ( $b$ ), que toma assim a seguinte expressão:

$$\frac{b}{h} = 0,5 \times \left[ \psi \times \frac{\left(\frac{H}{\delta}\right)}{(1 + \psi)} \right] \times \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.7)$$

Onde:

$$\psi = \beta \times \frac{\left[ \frac{2}{(1 + \alpha)} \right] + \beta - \frac{x}{6} \times \frac{1,13 \times \alpha}{\left[ (1 + \alpha) \left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \right]}}{(1 - \beta)^2} \quad (4.8)$$

$$\beta = \frac{\left(\frac{\delta}{H}\right) \times \alpha}{(1 + \alpha)} \quad (4.9)$$

Onde  $H$  é a altura do túnel de vento. A alteração da fórmula básica, referida anteriormente, consiste na redução do termo de fricção superficial, multiplicando-o por  $x/6$ , em que neste caso  $x = 4.5$ . Por fim, o pé de apoio dos pináculos é definido por um quarto da altura dos pináculos ( $h$ ).

Definindo-se as dimensões dos pináculos, seguem-se os elementos de rugosidade. A Equação (4.7) supõe que a jusante dos pináculos sejam colocados elementos de rugosidade cuja altura dos elementos ( $k$ ) e o espaçamento dos mesmos ( $D$ ) respeitem a seguinte expressão:

$$\frac{k}{\delta} = \exp \left[ \left( \frac{2}{3} \right) \times \log_{10} \left( \frac{D}{\delta} \right) - 0,1161 \times \left[ \left( \frac{2}{C_f} \right) + 2,05 \right]^{0,5} \right] \quad (4.10)$$

Em que  $C_f$  corresponde ao coeficiente de arrastamento necessário para obter o perfil de velocidades do tipo de potência com um expoente  $\alpha$ :

$$C_f = 0,136 \times \left( \frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \quad (4.11)$$

Segundo Irwin, baseando-se nos estudos de Wooding [15], a equação (4.10) só é válida se, se encontrar nos seguintes limites:

$$30 < \frac{\delta D^2}{k^3} < 2000 \quad (4.12)$$

Por fim, Irwin definiu que o espaçamento entre os pináculos seria  $h/2$ .

Para este caso de estudo em concreto, utilizou-se o material já presente no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada, da FCT-UNL, mais concretamente umas placas já com elementos de rugosidade utilizadas para uma tese de doutoramento [7]. Desta forma, fez-se o processo inverso que Irwin utilizou, e com alguma manipulação matemática, em vez de se começar pela construção dos pináculos, começou-se pelos elementos de rugosidade, já existentes, e descobriu-se quais as incógnitas necessárias para definir os pináculos.

Com a tentativa de se recriar um tipo de terreno 4, e recorrendo à bibliografia presente no capítulo 2 (consultar tabela 2.2) decidiu-se fixar um valor de  $\alpha$  para este tipo de terreno de  $\alpha = 0.32$ . Assim pode-se descobrir o valor de  $C_f$ , que se encontra definido na equação (4.11), tomando este o valor de  $C_f = 0,00799$ .

Como referido anteriormente, utilizou-se um conjunto de elementos já presentes no Laboratório de Mecânica dos Fluidos, sendo as dimensões destes elementos,  $k = 0,05m$  e  $D = 0,1m$  (tabela 4.4.1). Recorrendo-se à equação (4.10), foi possível descobrir a espessura de camada limite ( $\delta$ ) que se pretendia atingir, tomando esta o valor de  $\delta = 0,51m$ .

Com os valores de  $\delta$ , de  $k$  e de  $D$ , e recorrendo à equação (4.12), obteve-se o valor de 40.8, estando este dentro dos limites exigidos pela literatura, sendo possível avançar para o próximo passo, dimensionar os pináculos.

Tendo-se o valor de  $\alpha$ , bem como o valor da espessura da CLA ( $\delta$ ), e utilizando a equação (4.6), foi possível descobrir qual a altura que os pináculos deveriam de ter ( $h$ ), sendo esta  $h = 0,62m$ . De seguida, dimensionou-se a largura de base do pináculo ( $b$ ) recorrendo à equação (4.7), obtendo-se o valor de  $b = 0,1m$ . Para a dimensão do pé de apoio dos pináculos, como foi referido anteriormente, este deverá ser um quarto da altura dos pináculos, sendo assim será  $0,16m$ .

Posteriormente, numa tentativa de aumentar o estudo científico deste trabalho, decidiu-se utilizar uma combinação diferente de elementos de rugosidade, que também se encontravam presentes no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica Aplicada, da FCT-UNL. Todavia estes novos elementos de rugosidade, não são cúbicos, apresentando um formato paralelepípedo com uma área de  $0,05 \times 0,05 m^2$ , com  $k = 0,01m$  e  $D = 0,1m$ .

**Tabela 4.1 - Dimensões dos dois conjuntos de elementos de rugosidade**

	k (m)	D (m)
1º Conjunto de elementos	0,05	0,1
2º Conjunto de elementos	0,01	0,1

Aproveitando os pináculos já dimensionados para o tipo de Terreno 4, através de alguma manipulação matemática das equações (4.6) e (4.10), foi então possível determinar a espessura da CLA esperada,  $\delta = 0,48m$  bem como o novo tipo de terreno que se iria estudar,  $\alpha = 0,15$ .

Mais uma vez recorrendo à tabela 2.2, se verifica que o  $\alpha$  teórico obtido corresponde a um tipo de terreno 2.

De seguida, com os valores obtidos, pode-se verificar de seguida, se a relação entre a espessura da camada limite e os elementos de rugosidade se encontrava dentro dos limites esperados, sendo que  $\frac{\delta D^2}{k^3} = 4800$ . Como se pode verificar, este valor encontra-se bastante fora dos limites sugeridos por Irwin. No entanto, fazendo uma revisão bibliográfica mais extensa, chegou-se à conclusão que certos autores, sugerem que a altura dos elementos cúbicos se encontrem entre  $\frac{\delta}{16}$  e  $(h - \delta)$ , onde  $h$  é a altura dos pináculos e  $\delta$  é a espessura da CLA [8][34]. Tem-se então que  $\frac{\delta}{16} = 0,03m$  e  $(h - \delta) = 0,14m$ , mais uma vez ligeiramente longe do  $k = 0,01m$ . Desta forma, decidiu-se realizar na mesma os estudos para esta combinação de pináculos e elementos de rugosidade, com a curiosidade de se verificar que dados experimentais se obteriam, mas decidiu-se criar um novo tipo de pináculos para este tipo de elementos de rugosidade.

Para o dimensionamento destes novos pináculos, utilizou-se um processo iterativo, variando-se os valores de  $\alpha$  na equação (4.10), até se encontrar um valor teórico de  $\delta$  que satisfizesse os limites entre  $\frac{\delta}{16}$  e  $(h - \delta)$ . Fixando-se assim o tipo de terreno para um  $\alpha = 0.18$ , que corresponde a um tipo de terreno 2. Da equação (4.10), obteve-se uma espessura de CLA teórica de  $\delta = 0,24m$ . De seguida repetiu-se os mesmos passos referidos anteriormente, obtendo-se assim  $h = 0,31m$ ,  $b = 0,05m$  e o pé de apoio de  $0,08m$ .

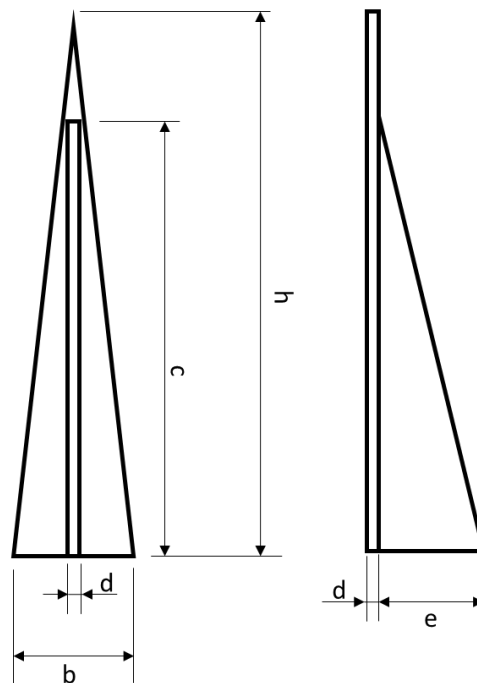
Num sentido de simplificar a descrição dos dois pináculos existentes, definiu-se os pináculos com  $h = 0,62m$  como sendo “Pináculos Grandes” e os pináculos com  $h = 0,31m$  como sendo “Pináculos Pequenos”. Na tabela 4.2 e tabela 4.3, encontra-se em detalhe as especificações dos pináculos bem como os tipos de terrenos que se pretendem calcular.

**Tabela 4.2- Dimensões dos Pináculos dimensionados**

Descrição	Pináculos Grandes	Pináculos Pequenos
h [m]	0,62	0,31
b [m]	0,09	0,05
c [m]	0,575	0,190
d [m]	0,003	0,003
e [m]	0,16	0,08

**Tabela 4.3- Detalhes dos pináculos dimensionados e tipo de terrenos estudados**

Descrição	Pináculos Grandes		Pináculos Pequenos
Tipo de Terreno	Terreno Tipo 4	Terreno Tipo 2	Terreno Tipo 2
Altura da secção de testes [m]	1		1
Largura da secção de testes [m]	1,5		1,5
Valor de $\alpha$ para o tipo de terreno estudado	0.32	0.15	0.18
Altura dos Pináculos, h [m]	0,62		0,31
Espessura da Camada Limite, $\delta$ [m]	0,51	0,48	0,24
Largura da base dos Pináculos, b [m]	0,09		0,05
Número de Pináculos	5		10
Espaçamento dos Pináculos de centro a centro [m]	0,310		0,115
Altura dos Elementos de Rugosidade, k [m]	0,05	0,01	
Espaçamento entre centros dos Elementos de Rugosidade, D [m]	0,10		



**Figura 4.7- Desenho técnico dos pináculos**

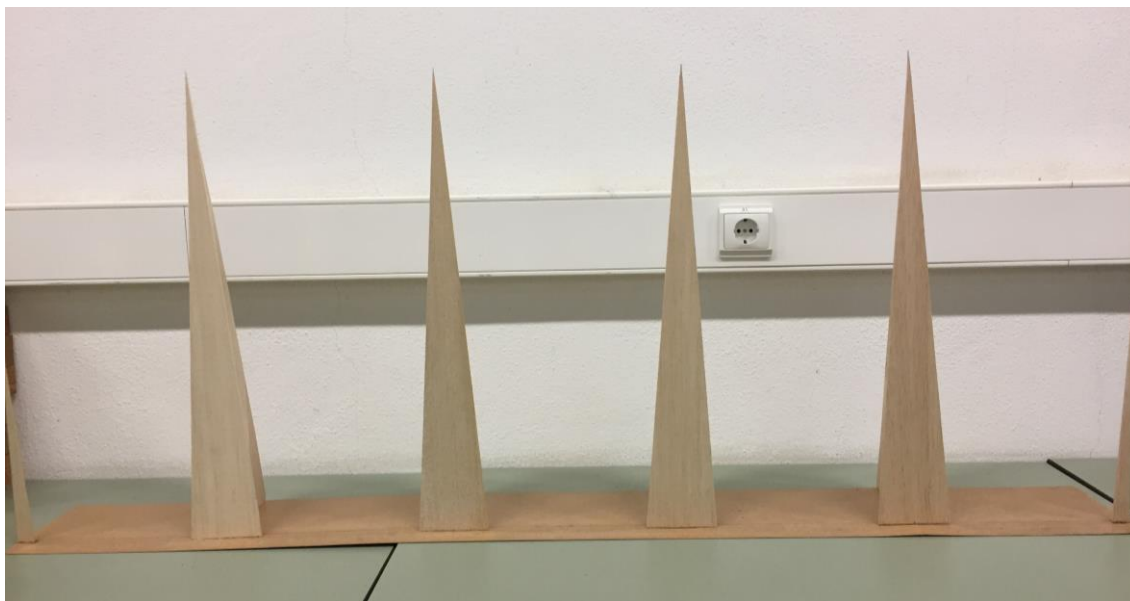
Para a construção dos pináculos optou-se por utilizar o material balsa, uma vez que se trata de um material que apresenta uma relação resistência/leveza bastante elevada, e tem ainda a vantagem de ser fácil de trabalhar. Ao realizar este tipo de experimentos, é frequente os autores acoplarem diretamente os pináculos ao chão do túnel de vento, no entanto, uma vez que iríamos utilizar dois tipos de pináculos decidiu-se acoplar os pináculos a uma placa. O material escolhido para esta placa foi MDF, sendo que para os Pináculos Grandes, a placa apresenta as seguintes dimensões  $0,20 \times 1,5 \text{ m}^2$ , e para os Pináculos Pequenos a placa apresenta as seguintes dimensões,  $0,11 \times 1,5 \text{ m}^2$ . De notar que ambas as placas têm  $0,005 \text{ m}$  de espessura.

Uma vez, que ao introduzir os pináculos com esta placa, iríamos criar, um pequeno degrau que iria afetar o escoamento. Desta forma criou-se uma pequena rampa em ambas as placas, com  $0,03 \text{ m}$  de largura, por forma a suavizar o escoamento. Esta rampa encontra-se demonstrada na figura 4.8.

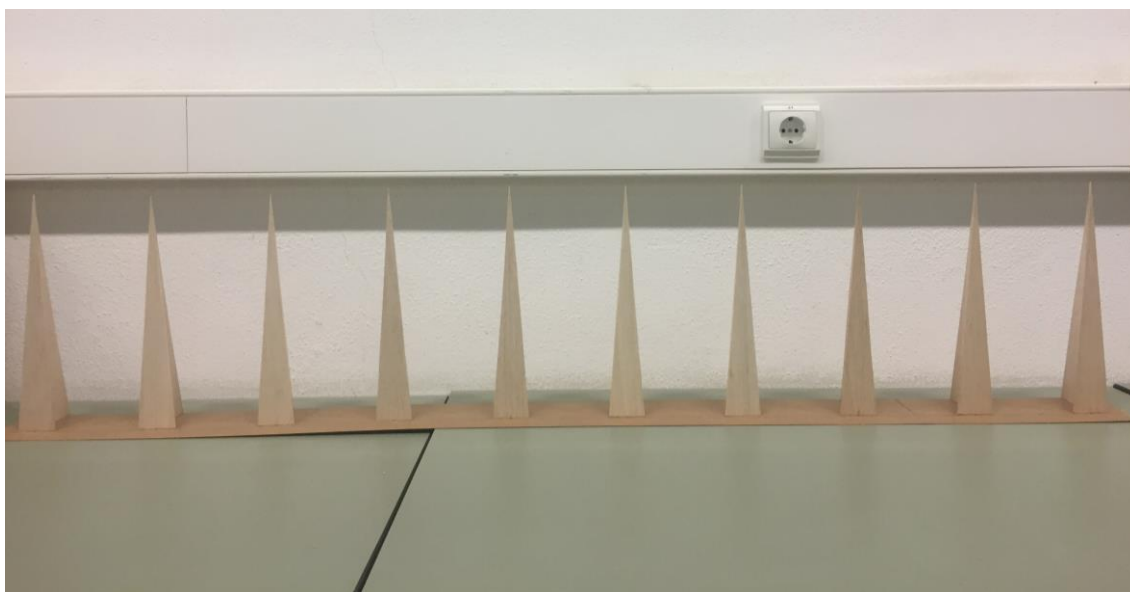


**Figura 4.8- Imagem da rampa criada nas placas de MDF**

Como referido anteriormente, o espaçamento entre pináculos deveria de ser  $h/2$ , onde  $h$  é a altura dos pináculos, utilizando como eixo de simetria a linha central do túnel de vento.



**Figura 4.9- Imagens dos pináculos grandes contruídos com as dimensões calculadas segundo o estudo de Irwin**



**Figura 4.10- Imagem dos pináculos pequenos contruídos com as dimensões calculadas segundo o estudo de Irwin**

#### **4.2.2 Construção do modelo de um edifício cúbico**

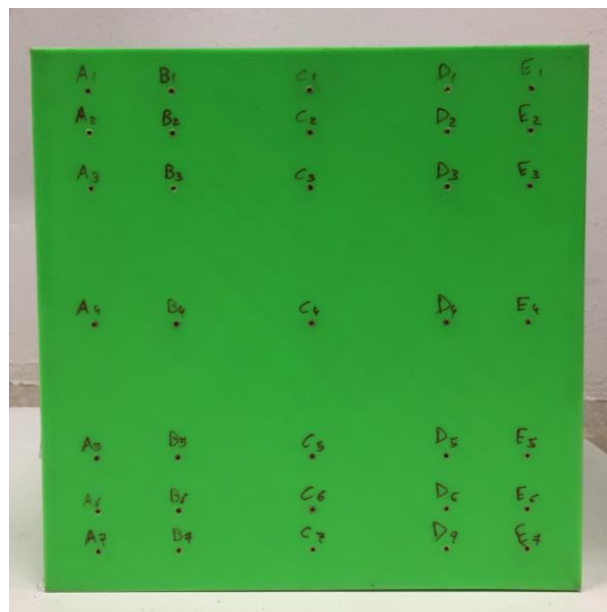
Para a modulação e construção do modelo cúbico, ponderou-se em várias alternativas de matérias. Nomeadamente balsa, que apesar de ser um material resistente e fácil de trabalhar, poderia apresentar bastantes desafios para se manter a forma cúbica do modelo. Outro material ponderado, foi o material acrílico, que apesar de ser bastante resistente e garantir mais facilmente a forma cúbica do modelo, é um material bastante dispendioso e difícil de trabalhar. Por fim optou-

se por se recorrer à manufatura de adição para a construção do modelo cúbico, sendo o material de adição PLA, esta escolha, baseou-se na facilidade de trabalhar com o material, a resistência do mesmo e a facilidade de se garantir a forma cúbica do modelo.

Na altura da modelação do cubo, teve-se em consideração que duas faces teriam de estar instrumentadas para poder fazer as leituras dos coeficientes de pressão, sendo estas a face que corresponderia ao “teto” do cubo, bem como uma outra face lateral. Tomou-se ainda em consideração que apesar de a manufatura de adição já ser capaz de garantir superfícies com baixa rugosidade, a superfície do cubo que estivesse em contacto com a base de impressão teria um acabamento bastante melhor que as outras 5 faces, caso se optasse pela impressão do modelo de uma só vez. Tendo isto em consideração, decidiu-se construir um cubo modelar, ou seja, o cubo seria formado por 6 faces separáveis, em vez de um cubo semi-rígido. Esta solução não só resolveria o problema da rugosidade, pois imprimindo uma face de cada vez garantia-se que todas as faces teriam garantidamente o melhor acabamento possível, por serem todas impressas diretamente na base da impressora. Como também resolveria o problema da face instrumentada, pois assim só se necessitaria de instrumentar uma face, que poderia trocar de posições sempre que fosse preciso ler os Cps nas laterais do cubo ou no teto do mesmo.

As faces são unidas umas com as outras, através de porcas encastradas a quente no material, e parafusos. E para se garantir a união perfeita de face com face, em vez dos lados da face acabarem em aresta viva, acabam em cunha de modo a facilitar o encaixe das mesmas.

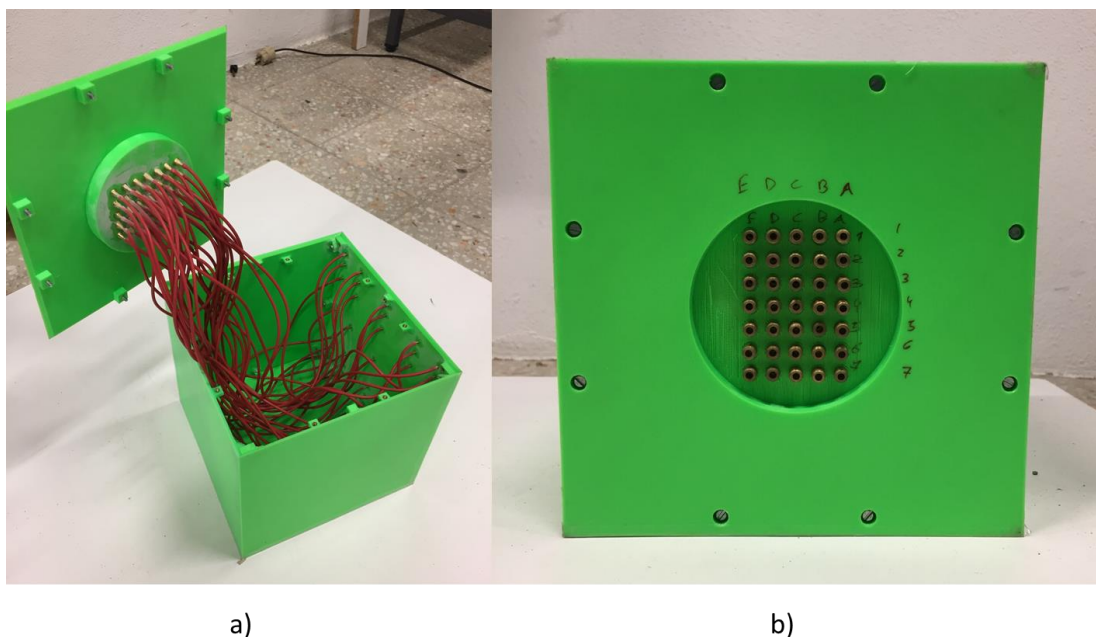
Por forma a garantir que o modelo cúbico estaria totalmente embebido dentro da CLA, depois de formada, optou-se por criar um modelo cúbico de 20x20x20cm. Sendo ainda definido que o cubo teria de ter uma face instrumentada com 35 tomadas de pressão como está representado na figura 4.11.



**Figura 4.11- Distribuição dos pontos de tomada de pressão na face instrumentada do modelo cúbico**

Na leitura dos coeficientes de pressão, tem de se garantir que a tomada de pressão seja milimétrica. Inicialmente tentou-se que na impressão 3D com que as os 35 furos milimétricos já estivessem na face instrumentada. Isto provou ser uma dificuldade, pois a impressora não conseguia garantir com rigor o diâmetro milimétrico em todas as 35 tomadas. Para solucionar este problema, decidiu-se aumentar o diâmetro das tomadas impresso pela impressora para 2,5mm, e tornear à parte as 35 tomadas de pressão milimétricas. Para tal recorreu-se ao torno Schaublin Type 102-80 presente no laboratório de Máquinas do Departamento de Mecânica, da Universidade Nova de Lisboa, Campus da FCT-UNL, onde se maquinou as 35 tomadas de pressão a partir de varão de latão, que posteriormente seriam inseridos à pressão na face instrumentada, e onde seriam ligados tubos de borracha a cada uma das 35 tomadas de pressão.

Para garantir que os tubos não influenciariam o escoamento, era necessário que saíssem por debaixo do modelo diretamente para fora da secção de estudos, onde se iriam realizar as leituras. Uma vez que o tubo utilizado para se realizar as leituras no manómetro BETZ 2500, tinha um diâmetro de 5mm, e o tubo utilizado nas tomadas de pressão tinha 1mm era necessário, criar uma peça redutora. Desta forma outras 35 peças foram torneadas em varão de latão para fazer a união do tubo milimétrico para o tubo de 5 mm, estas peças foram introduzidas na base do cubo, para não perturbarem o escoamento. Na figura 4.12 encontra-se as imagens do interior do cubo a) e da sua respetiva base b).



**Figura 4.12- Imagem do interior do cubo a) e imagem da base do cubo b)**



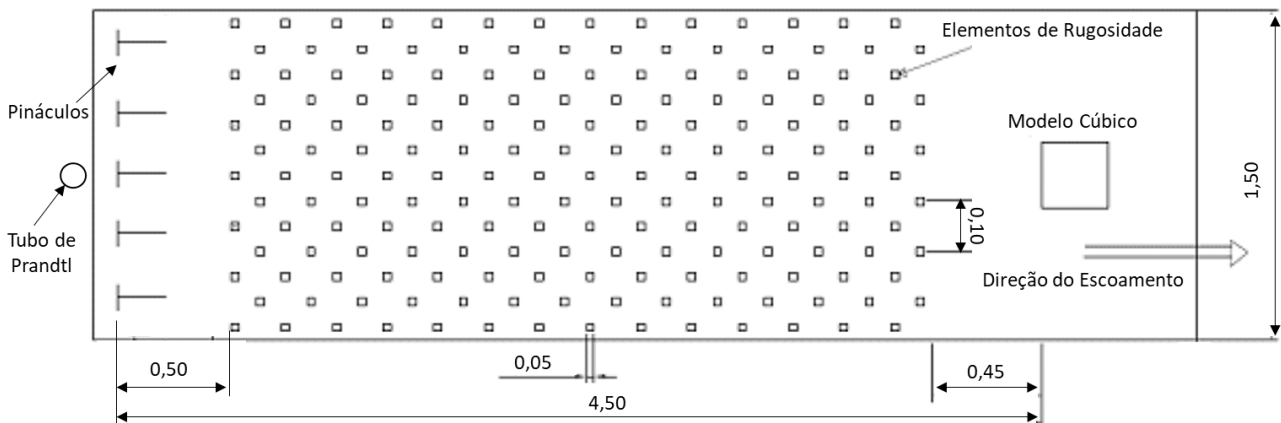
### 4.3 Preparação da componente experimental

Depois de todos os componentes terem sido construídos, procedeu-se à preparação da análise experimental.

Como foi referido anteriormente, é necessário garantir que o túnel se encontra com um gradiente de pressão nulo longitudinal. Para tal procedeu-se à leitura das pressões estáticas nas tomadas de pressão distribuídas ao longo de todo o comprimento do teto do túnel aerodinâmico, como ilustrado na figura 4.1.

Após garantido o gradiente de pressão nulo no teto, estavam reunidas as condições necessárias para iniciar a leitura dos perfis de velocidade para cada tipo de terreno proposto. Os ensaios a realizar dividiram-se em três grupos. Inicialmente, pretendia-se obter as características do perfil de velocidades ao longo do túnel de vento em vazio, sendo estas avaliadas em três secções longitudinais. Estes primeiros ensaios serviram de resultados base pelos quais nos guiamos para comparar com os ensaios seguintes. Em segundo lugar simulou-se a CLA para os dois tipos de terrenos que se decidiu estudar, onde se obteve os perfis médios de velocidades dos mesmos. Por fim, realizaram-se os estudos dos coeficientes de pressão sobre o modelo de um edifício cúbico, que foi colocado numa zona onde a CLA já estaria totalmente desenvolvida.

Nos ensaios sem elementos de rugosidade, três secções do túnel foram analisadas, localizadas a 0,30 m, 2,10 m e 4,10 m do início da soleira túnel aerodinâmico. Nestas secções foi ainda medido o perfil de velocidades em altura no plano de simetria e a 0,25 m afastado deste, à exceção da secção inicial aos 0,30m. Com estes resultados foi possível ter a perceção sobre a uniformidade transversal do perfil de velocidades. Nas figuras 4.13 e 4.14 encontra-se esquematizado, a secção de testes.



**Figura 4.13- Esquema da disposição dos pináculos e dos elementos de rugosidade no túnel aerodinâmico, bem como as respetivas dimensões em metros**



**Figura 4.14- Configuração da seção de estudo com pináculos, elementos de rugosidade e modelo cúbico**



## Capítulo 5

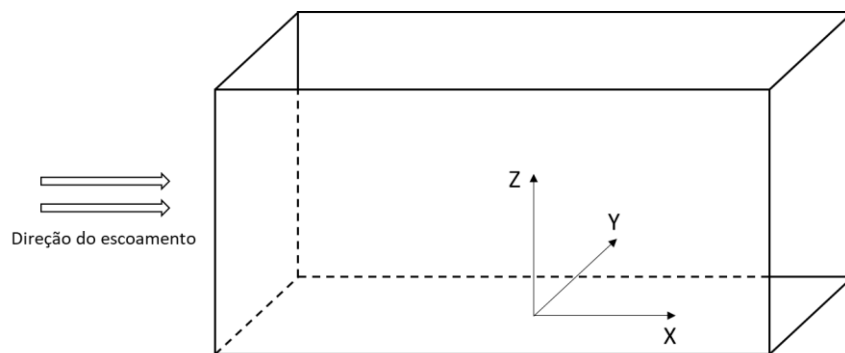
### 5. Resultados Experimentais e Discussão

Neste capítulo as características do escoamento irão ser avaliadas, seguindo-se os testes experimentais dos pináculos para os dois tipos de terreno, com as respetivas leituras dos coeficientes de pressão no modelo cúbico. Por fim procede-se à discussão dos resultados obtidos.

#### 5.1 Ensaaios com o Túnel de vento em vazio

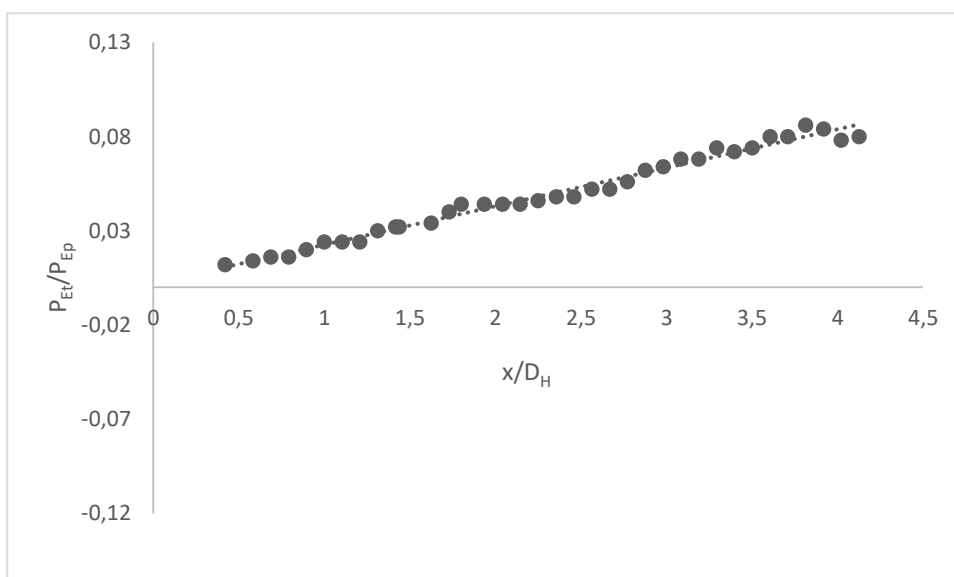
Como referido no capítulo anterior, esta primeira fase de estudo, consistiu na análise do escoamento em túnel de vento sem qualquer elemento de rugosidade ou pináculos, por forma a entender qual o comportamento do escoamento nestas condições.

Para se verificar a ocorrência de tal efeito, foram realizados um conjunto de medições com o auxílio de um tubo de Pitot montado num graminho de precisão, para se medir a velocidade média a uma dada altura  $\bar{U}$  e utilizou-se um tubo de Prandtl para se medir a velocidade do escoamento a uma altura não perturbada ( $\bar{U}_\delta$ ), esta foi fixada em cerca de 10 m/s para todos os ensaios realizados. De modo a facilitar a leitura, definiu-se um sistema de coordenadas demonstrado na figura 5.1.



**Figura 5.1- Definição do sistema de coordenadas do túnel aerodinâmico**

Inicialmente, foi necessário verificar se o túnel aerodinâmico se encontrava em gradiente de pressão nulo, ao longo da sua secção longitudinal. Para tal procedeu-se à aquisição dos coeficientes de pressão estáticos, demonstrados na figura 4.1. Uma vez que só 5m dos 9m totais do túnel de vento seriam utilizados, para a realização destes experimentos, decidiu-se medir também os coeficientes de pressão estáticos até à cota de 5m. Os resultados encontra-se demonstrados na figura 5.2.

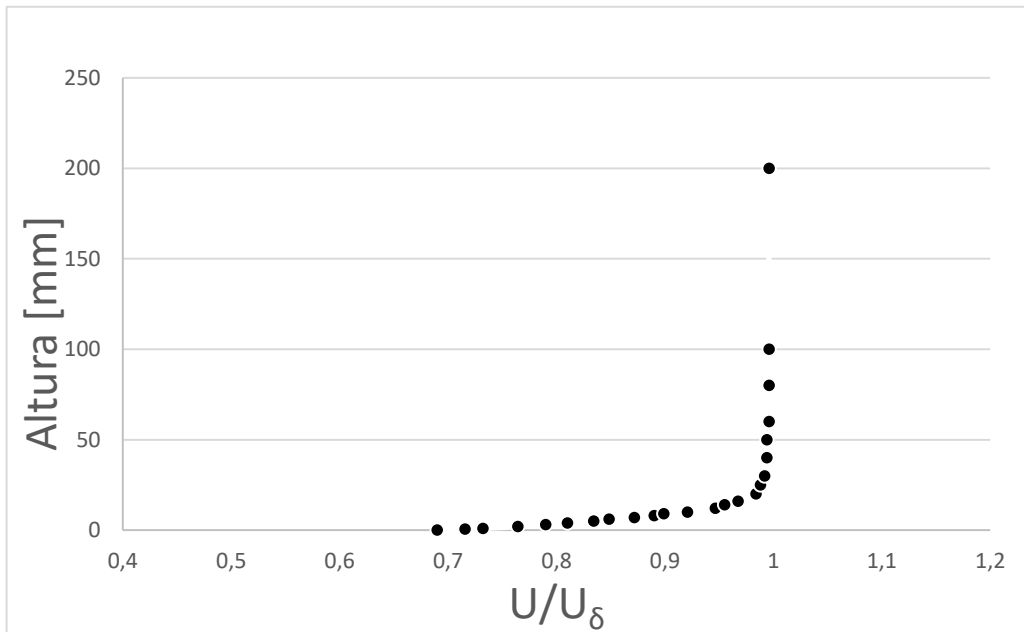


**Figura 5.2- Coeficientes de pressão estática do túnel de vento para túnel em vazio**

Do gráfico se pode verificar que, o Túnel aerodinâmico, não se encontra totalmente em gradiente de pressão negativo, mas no entanto estes valores não se encontram longe do desejado. Desta forma optou-se por não se tentar ajustar melhor as placas do teto do túnel, uma vez que tal processo é bastante complicado, e demoroso.

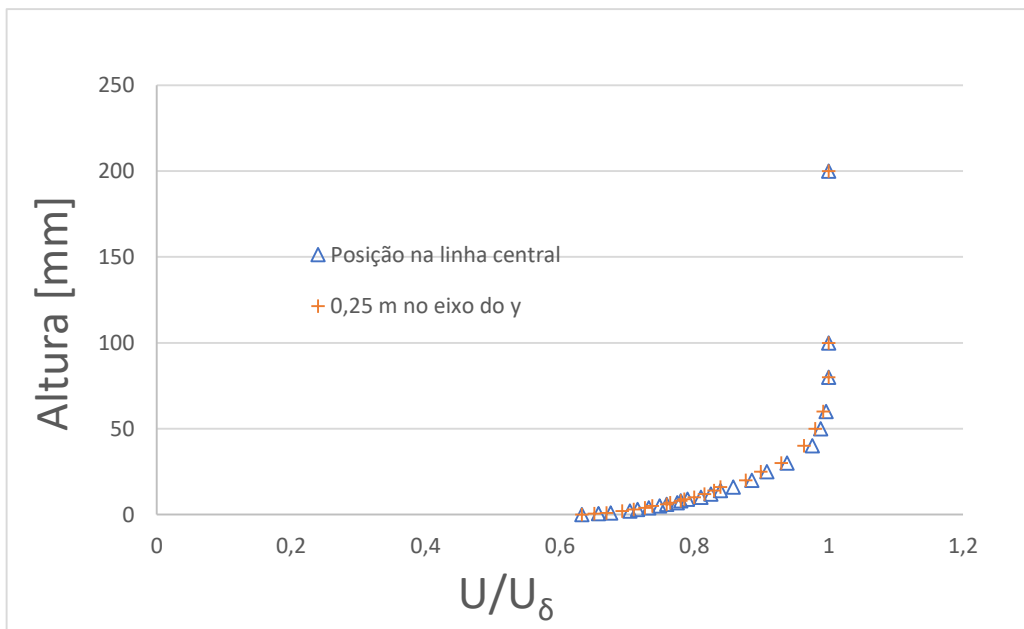
De seguida procederam-se às medições dos perfis de velocidades para o túnel de vento vazio. Como foi referido na secção 4.3, neste estudo foram realizadas cinco medições diferentes, em três secções transversais, desde o início da secção de estudo do túnel, estando estas secções localizadas a 0,30m; 2,10m e 4,10m ao longo do eixo do x. Foi ainda medido o perfil de velocidades médio para a secção 2,10m e 4,10m, a 0,25m no eixo do y.

Para a secção 0,30m obteve-se o perfil de velocidades presente na figura 5.3.



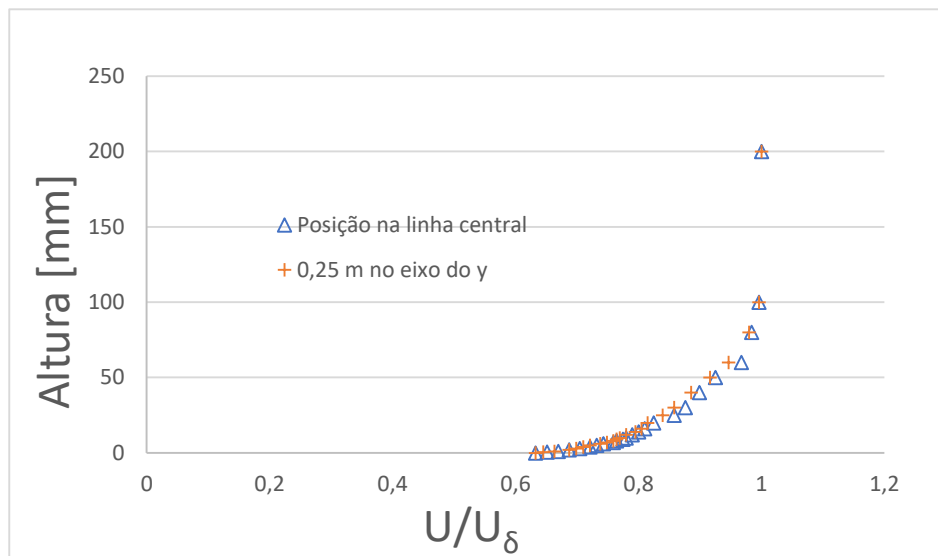
**Figura 5.3-** Perfil de velocidades obtido para a secção  $x=0,30m$  em túnel vazio

Para a secção  $x = 2,10m$ , juntou-se as medições na linha central bem como a 0,25m afastada no eixo do y, no mesmo gráfico, e este encontra-se demonstrado na figura 5.4.



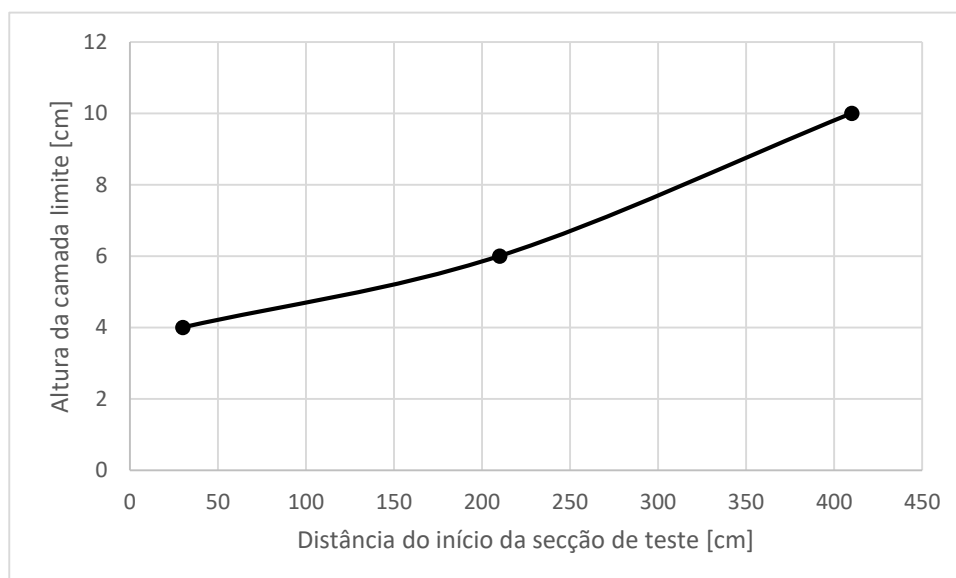
**Figura 5.4-** Perfis de velocidade para  $x=2,10m$  na linha central e para  $x=2,10m$  e afastado 0,25m no eixo do y em túnel vazio

E por fim para a secção  $x = 4,10\text{ m}$  e  $4,10\text{ m}$  afastado  $0,25$  no eixo do  $y$ , obteve-se os perfis de velocidades representados na figura 5.5.



**Figura 5.5-** Perfis de velocidade para  $x=4,10\text{m}$  na linha central e para  $x=4,10\text{m}$  e afastado  $0,25\text{m}$  no eixo do  $y$  em túnel vazio

A altura da camada limite ( $\delta$ ) foi definida como a altura para a qual se estima que  $\bar{U}$  supera 99% de  $\bar{U}_\delta$ . Os dados da figura 5.6 representam a espessura da camada limite ao longo da secção de estudo do túnel de vento.



**Figura 5.6-** Desenvolvimento da espessura da CLA ao longo do túnel aerodinâmico

Devido à superfície do chão nunca ser completamente lisa, a velocidade muito próxima do chão é nula. A superfície impõe uma tensão por efeito viscoso sobre o escoamento, que origina o desenvolvimento de uma camada limite. À medida que se progride ao longo do túnel, verifica-se o desenvolvimento da camada limite. Este fenómeno observa-se na figura 5.6, onde se pode verificar a formação de uma pequena camada limite ao longo do túnel aerodinâmico em vazio. Embora pequena, a perturbação é notória, suficiente para afetar os resultados experimentais, tendo mais impacto, na medição dos perfis de velocidade mais próximos do solo.

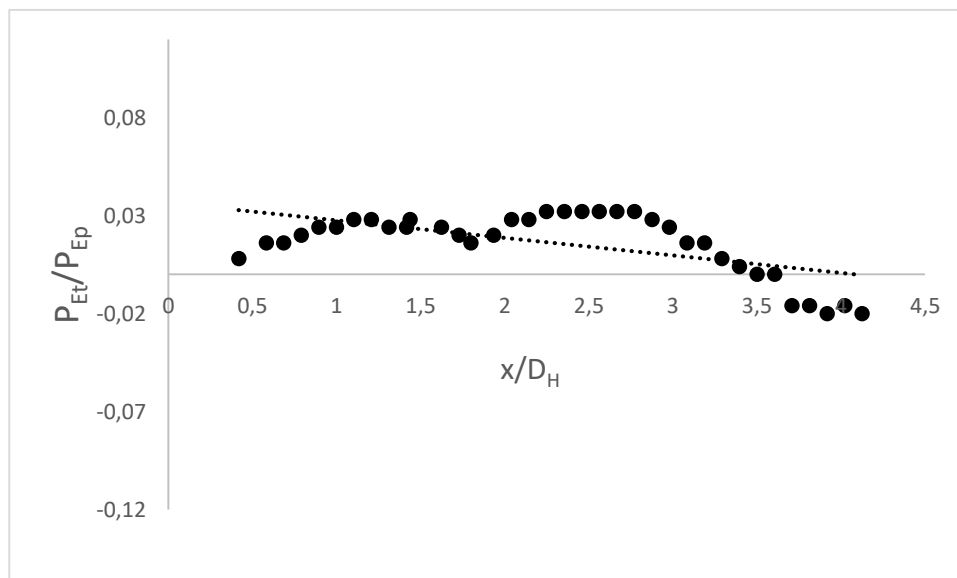
As medições realizadas nas secções deslocadas no eixo do y, demonstraram bastante aproximação aos valores obtidos nas medições realizadas na linha central. No entanto é visível uma ligeira diferença na figura 5.4 e figura 5.5, esta pode ser explicada, pela interação com as paredes envidraçadas do túnel de vento, que afetam ligeiramente o escoamento sendo isso também notório nos valores da CLA obtidos.

## 5.2 Verificação da CLA gerada

### 5.2.1 Ensaio experimental para tipo de terreno 4 com pináculos grandes

Nesta fase experimental procedeu-se ao estudo para dois tipos de terreno em conjunto com os pináculos. O primeiro terreno estudado foi o terreno de tipo 4, que corresponde a um tipo de terreno urbano. Como foi enunciado na secção 4.2, para este tipo de terreno fixou-se um  $\alpha$  teórico de  $\alpha = 0,32$ , onde se previa obter uma espessura de camada limite ( $\delta$ ) de 0,51m na zona de teste a  $x = 4,10m$ .

À semelhança dos estudos para túnel de vento em vazio, foi necessário verificar se o túnel se encontrava em gradiente de pressão nulo com a introdução dos pináculos e elementos de rugosidade. Tal está demonstrado na figura 5.7.

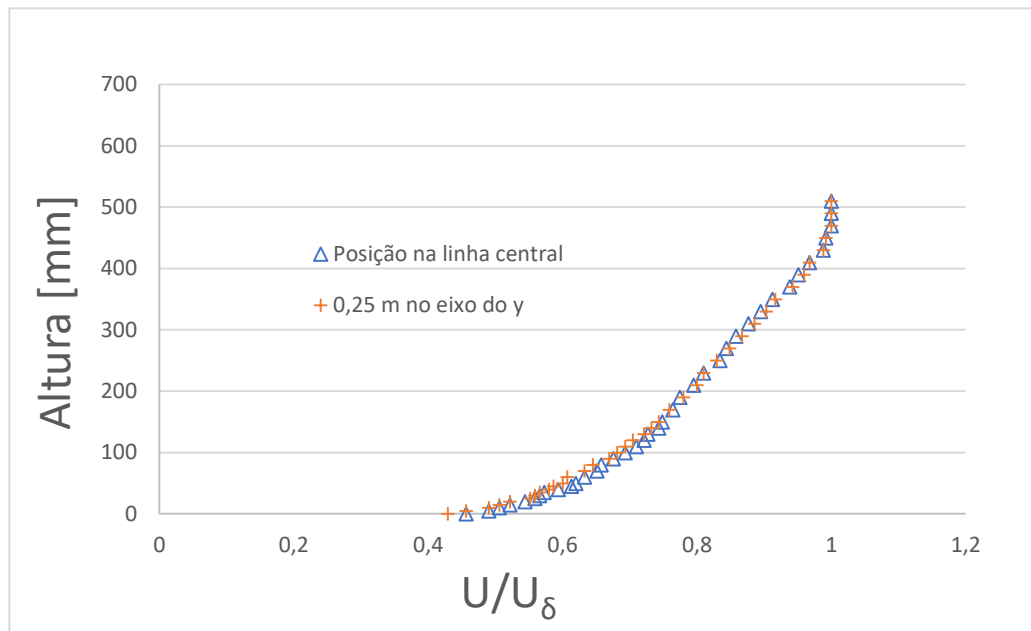


**Figura 5.7- Coeficientes de pressão estática do túnel de vento para túnel com elementos de rugosidade  $k=0,05m$**

Da leitura do gráfico da figura 5.7, pode-se concluir que o túnel se encontrava com um gradiente de pressão próximo do nulo, sendo que os pontos que marcaram uma maior dispersão dos valores desejado, só diferiam 1 Pa, o que se torna desprezável. De notar ainda que nas zonas de transição entre placas, se notava maior discrepância nos resultados obtidas. Isto demonstra a dificuldade na calibração da experiência, de modo a se conseguir garantir que os requisitos necessários estariam o mais próximo possível do ótimo.

De seguida procedeu-se à aquisição dos perfis de velocidades em quatro secções do túnel aerodinâmico, sendo duas delas ao longo da linha central do túnel em  $x = 2,10m$  e  $x = 4,10m$ , e as outras deslocadas  $0,25m$  da linha central, no eixo do  $y$ , para as mesmas cotas de  $x$ .

Para a secção localizada em  $x = 2,10m$ , obteve-se o seguinte gráfico representado na figura 5.8. Neste gráfico encontra-se também representado o perfil de velocidades para  $x = 2,10m$  no eixo central e a  $y = 0,25m$ .

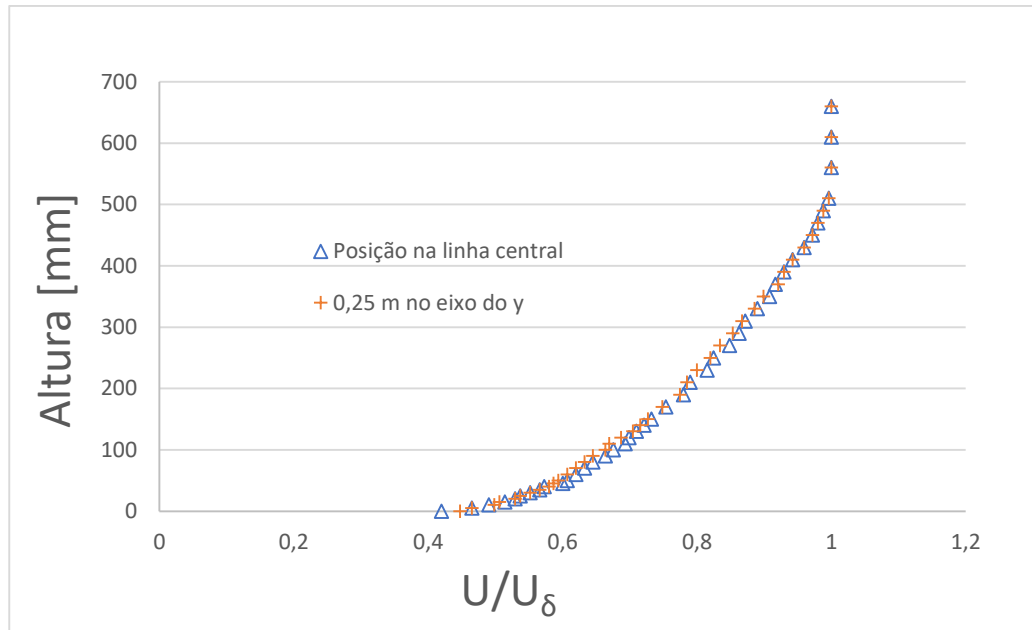


**Figura 5.8- Perfis de velocidade para  $x=2,10m$  na linha central e para  $x=2,10m$  afastado  $0,25m$  no eixo do  $y$  com elementos  $k=0,05m$**

Da figura 5.8 pode-se verificar que a espessura de CLA nesta secção apresenta o valor de  $\delta = 0,45m$ .

Para a secção localizada em  $x = 4,10m$ , obteve-se o seguinte gráfico representado na figura 5.9. Neste gráfico encontra-se também representado o perfil de velocidades para  $x = 4,10m$  no eixo central e a  $y = 0,25m$ .





**Figura 5.9- Perfis de velocidade para  $x=4,10m$  na linha central e para  $x=4,10m$  afastado  $0,25m$  no eixo do  $y$  com elementos  $k=0,05m$**

Como se pode verificar pela análise gráfica, obteve-se o valor de  $\delta = 0,51m$  para a espessura da CLA, na secção  $x = 4,10m$ , que corresponde à zona onde a CLA está totalmente desenvolvida. Verificamos assim que a espessura da CLA experimental iguala a espessura da camada limite de projeto para a secção  $x=4,10m$ . Analisando as figuras 5.8 e 5.9 podemos concluir que o crescimento da CLA é de 20cm por cada metro percorrido na direção  $x$ .

Para se verificar se o valor de  $\alpha$  para este terreno, corresponde ao valor de  $\alpha$  teórico, teve de se realizar alguma manipulação gráfica. Como se sabe a lei de potência é representada pela fórmula 5.1:

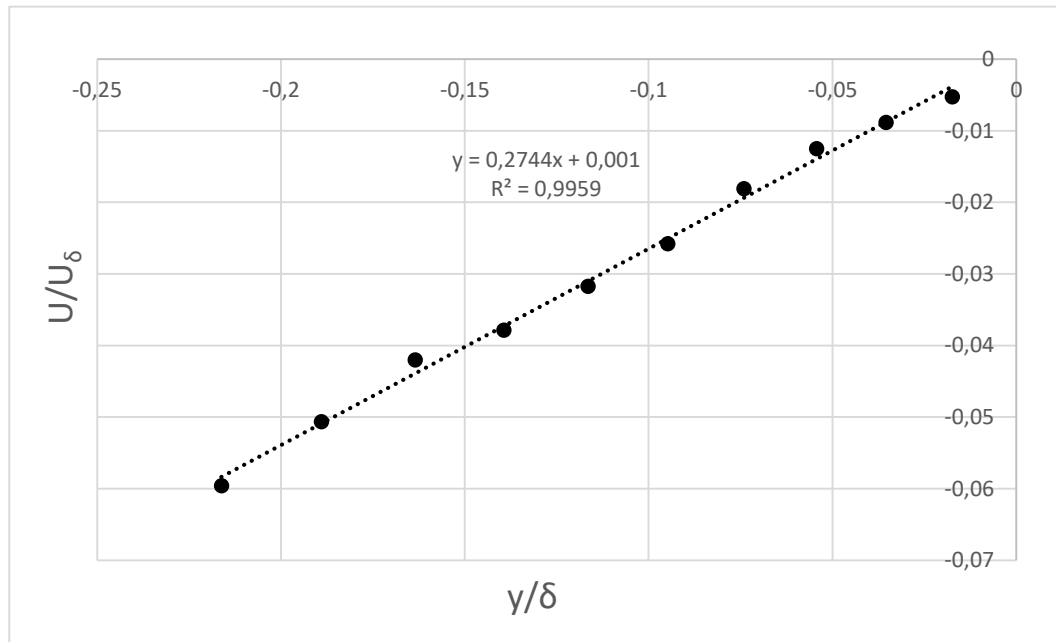
$$\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)} = C \left( \frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

Onde  $C$  é uma constante, que normalmente é igual a um. Das medições realizadas, conseguiu-se obter os valores da relação  $\frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)}$ , bem como da relação  $\left( \frac{z}{\delta} \right)$ , no entanto não se consegue obter por medição direta no túnel o valor de  $\alpha$ . Para se realizar o ajuste de potência temos de realizar a seguinte manipulação matemática:

$$\ln \left( \frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)} \right) = \alpha \ln \left( \frac{z}{\delta} \right) + \ln(C) \quad (5.2)$$

Recorrendo ao programa Excel, gerou-se um gráfico com o perfil de velocidades que se pretendeu estudar, estando no eixo do  $x$  os valores de  $\ln \left( \frac{\bar{U}(z)}{\bar{U}(\delta)} \right)$  e no eixo do  $y$  os valores de  $\ln \left( \frac{z}{\delta} \right)$ , onde se passou a escala dos mesmos para escala logarítmica. De seguida realizou-se uma regressão linear sobre os valores obtidos. Para a análise ser bem sucedida é necessário retirar os pontos

das zonas de esteira, pois estes têm tendência a estar fora da linha de regressão linear. O resultado deste gráfico encontra-se na figura 5.10:



**Figura 5.10- Ajuste de potência para o perfil de velocidades de tipo de terreno 4 a x=4,10m**

Como se pode verificar pelo gráfico da figura 5.10, obteve-se um valor de  $\alpha = 0,27$ , que apesar de não ser igual ao valor teórico esperado ( $\alpha = 0,32$ ), é um valor bastante aproximado, estando este ainda na categoria de terreno tipo 4 (tabela 2.2), que era o tipo de terreno alvo na fase de projeto. De notar ainda que o valor da constante C foi de 1, que era o esperado para este caso. Obteve-se ainda um coeficiente de correlação,  $R^2 = 0,9959$ , que é um coeficiente excelente para o tipo de trabalho que foi desenvolvido.

De seguida, procedeu-se ao ajuste logarítmico, dos perfis de velocidades, para validar ainda mais os resultados obtidos, e garantir que se conseguem ajustar pela lei logarítmica. Através de manipulação matemática, como foi realizado para a lei de potência, temos assim representado na equação 5.3, a lei logarítmica:

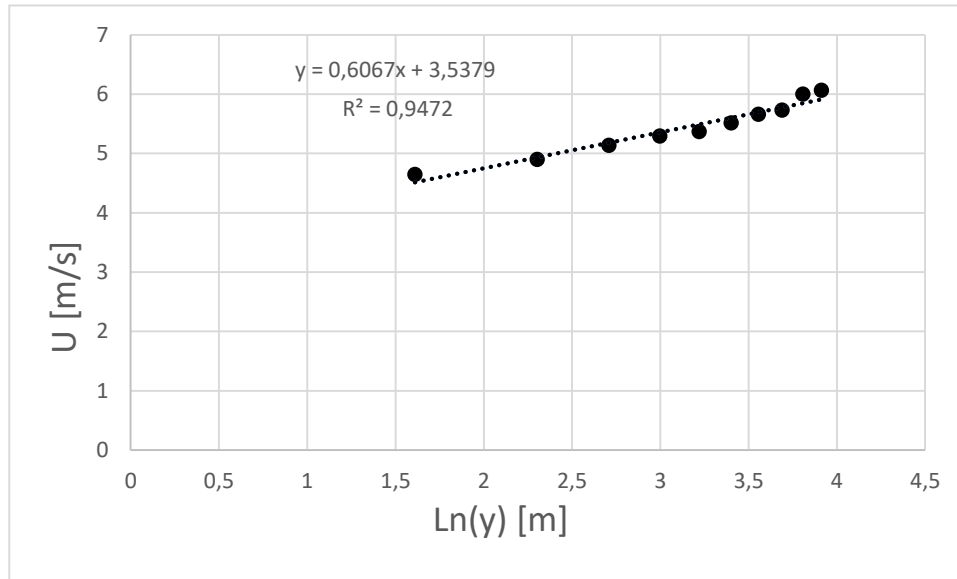
$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z}{z_0} \quad (5.3)$$

Reescrevendo esta equação, de modo a se conseguir obter os valores de  $u^*$  e  $z_0$ , obtemos a seguinte equação 5.4:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{K} \ln(z) - \frac{u^*}{K} \ln(z_0) = D \ln(y) + E \quad (5.4)$$

Onde D e E são constantes que se obtêm do gráfico gerado no Excel, fazendo uma regressão linear. Como foi explicado na secção 2.1, a lei logarítmica, ajusta-se bem para os valores do perfil

de velocidades médios, entre 10% e 20% da espessura da CLA, tendo isto em consideração procedeu-se ao ajuste dos pontos de modo a se obter o gráfico representado na figura 5.11, que tem ainda em consideração as alterações da equação 5.4.

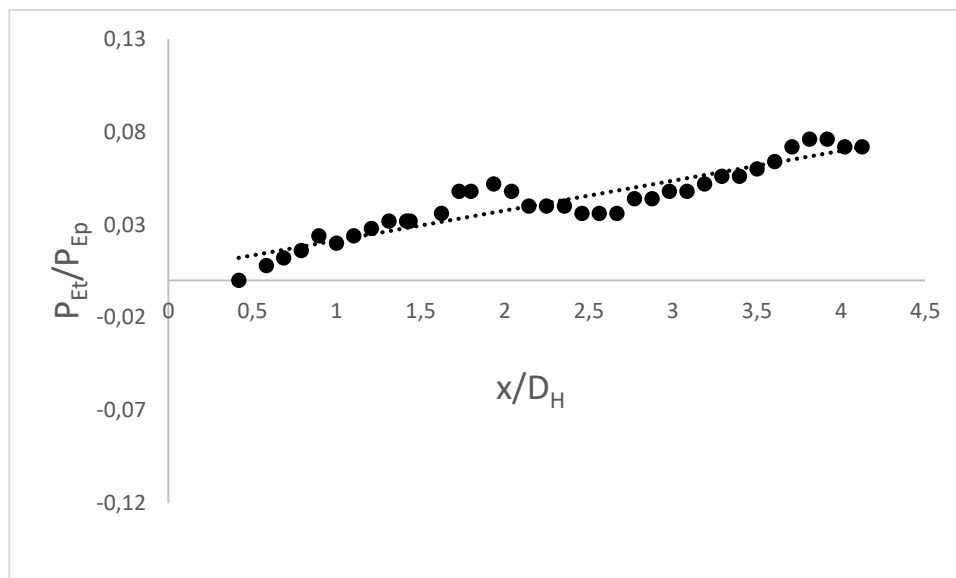


**Figura 5.11- Ajuste logarítmico para o perfil de velocidades de tipo de terreno 4 a x=4,10m**

Como se pode observar do gráfico, obteve-se assim um valor de  $D = 0,6067$  e um valor de  $E = 3,5379$ . Da equação 5.4, podemos retirar que  $D = \frac{u^*}{K}$  e  $E = -D \ln(z_0)$ . Desta forma podemos descobrir os valores de  $u^*$  e de  $z_0$ , sendo estes  $u^* = 1,52 \text{ ms}^{-1}$  e  $z_0 = 0,0029 \text{ m}$ . Através da referência bibliográfica [35], sabemos que para um tipo de terreno 4 na natureza se obtêm uma CLA com espessura de 450m. Para este tipo de terreno segundo a tabela 2.3, é suposto que  $z_0 = 2 \text{ m}$ . Assim realizando uma simples regra de três simples, obtemos o valor de  $z_0$  teórico que se deveria obter, ou seja,  $z_0 = 2 \times \left(\frac{0,510}{450}\right) = 0,0023 \text{ m}$ , podendo verificar-se que o valor teórico é bastante próximo do valor experimental obtido.

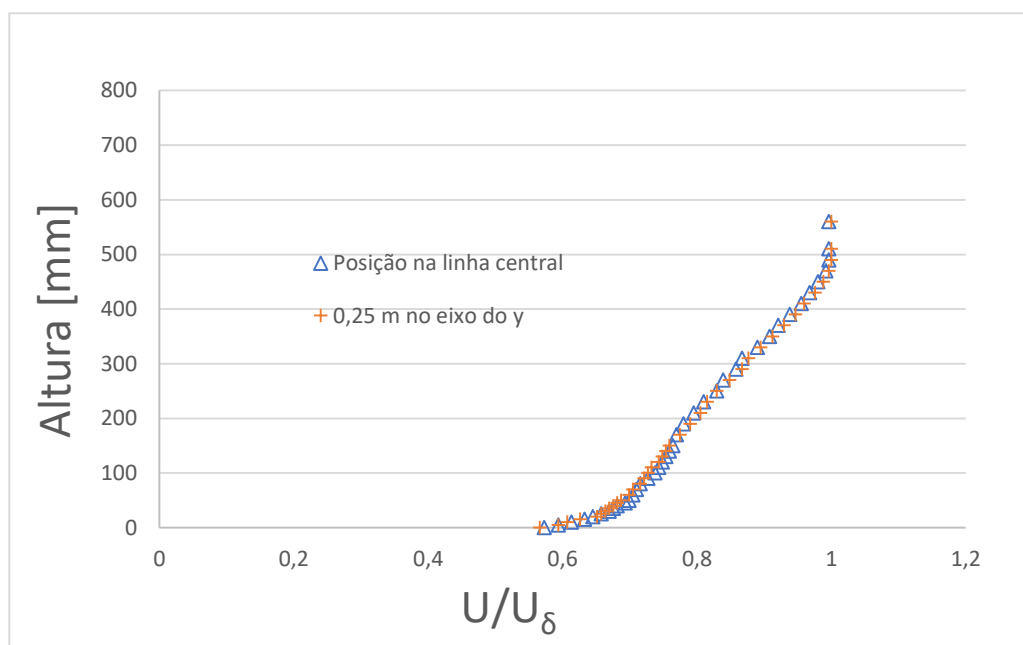
### 5.2.2 Ensaio experimental para terreno tipo 2 com pináculos grandes

O segundo estudo a ser realizado foi para o terreno de tipo 2 onde se combinou os elementos de rugosidade de  $k = 0,01 \text{ m}$  com os pináculos grandes. À semelhança dos estudos para túnel de vento em vazio e elementos de rugosidade de  $k = 0,05 \text{ m}$ , foi necessário verificar se o túnel se encontrava em gradiente de pressão nulo para estes novos elementos de rugosidade. Tal encontra-se demonstrado na figura 5.12.



**Figura 5.12- Coeficientes de pressão estática do túnel de vento para túnel com elementos de rugosidade  $k=0,01m$**

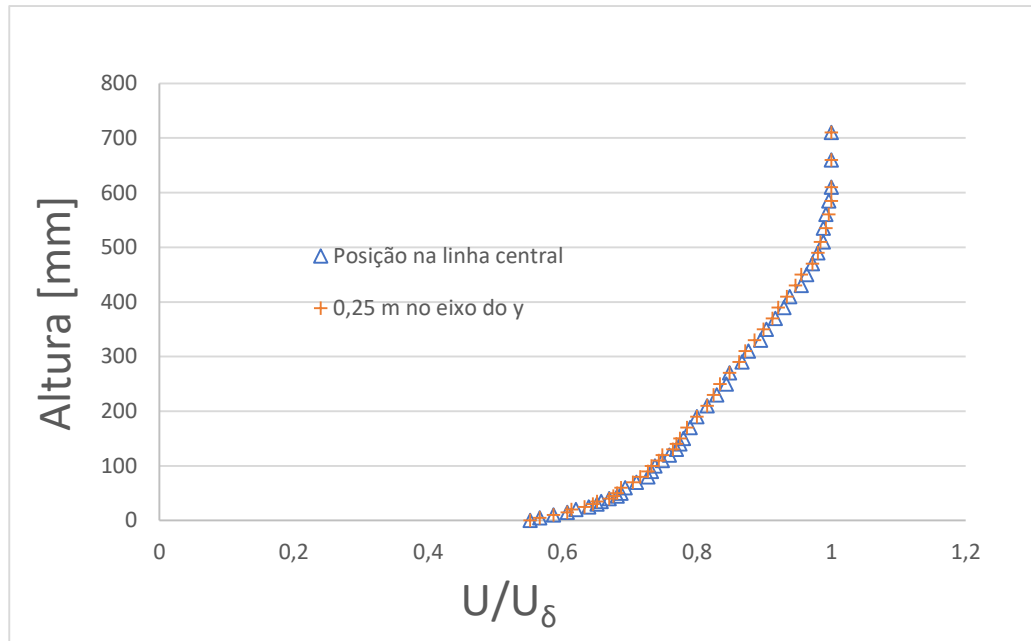
Da figura 5.12 retira-se que, o Túnel aerodinâmico, não se encontra totalmente em gradiente de pressão negativo, sendo que atinge pressões superiores na zona mais a jusante do túnel, no entanto os valores obtidos em pouco vão afetar os resultados teóricos. Desta forma optou-se por não se tentar ajustar melhor as placas do teto do túnel, à semelhança do que se fez no terreno de tipo 4.



**Figura 5.13- Perfis de velocidade para  $x=2,10m$  na linha central e para  $x=2,10m$  e afastado 0,25m no eixo do y com elementos  $k=0,01m$  e pináculos grandes**

Repetindo o procedimento da experiência anterior procedeu-se às medições dos perfis de velocidades para a secção  $x = 2,10m$  e a  $y = 0,25m$ , estando estes perfis demonstrados no gráfico da figura 5.13. Desta figura pode-se observar que a espessura da CLA obtida foi de  $\delta = 0,47m$  que já se aproxima bastante do valor teórico de projeto.

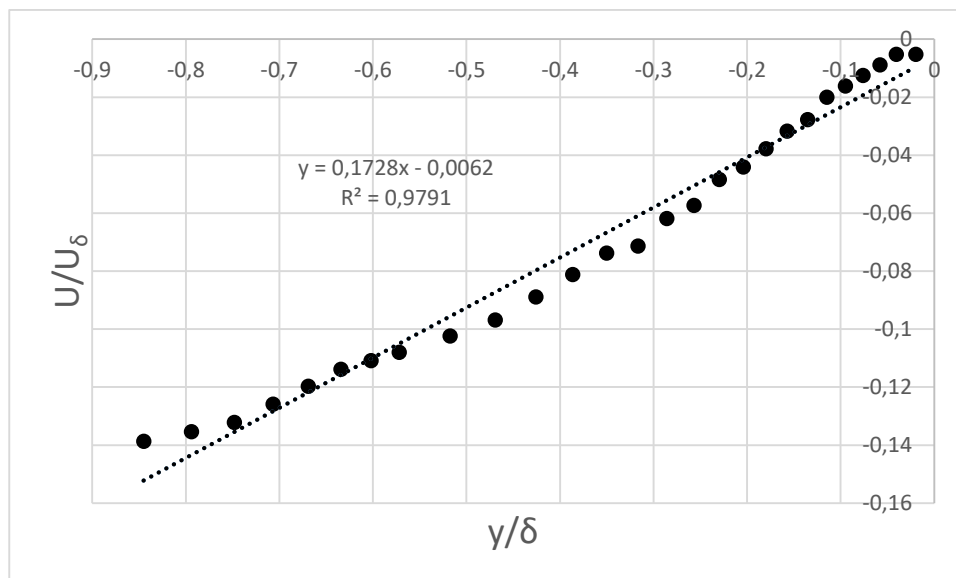
Para a secção localizada em  $x = 4,10m$ , obteve-se o seguinte gráfico representado na figura 5.14. Neste gráfico encontra-se também representado o perfil de velocidades para  $x = 4,10m$  no eixo central e a  $y = 0,25m$ .



**Figura 5.14- Perfis de velocidade para  $x=4,10m$  na linha central e para  $x=4,10m$  e afastado  $0,25m$  no eixo do  $y$  com elementos  $k=0,01m$  e pináculos grandes**

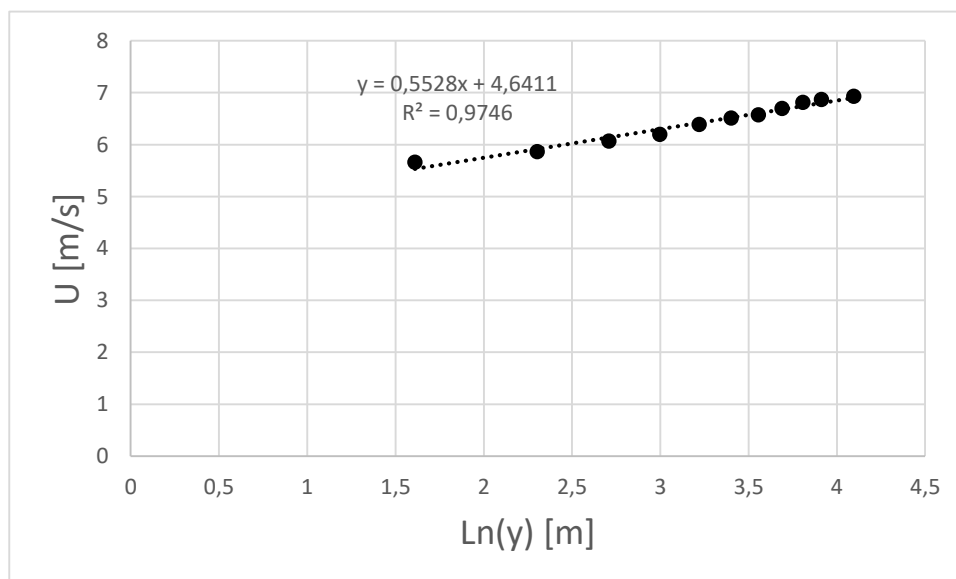
Na análise o gráfico da figura 5.14, verificamos que a espessura da camada limite foi de  $\delta = 0,56m$  que é um pouco longe da espessura de camada limite idealizada em fase de projeto  $\delta = 0,48m$ .

À semelhança do que se fez para o tipo de terreno 4, procedeu-se ao ajuste de potência para os perfis de velocidades, medidos neste terreno. Estes encontram-se demonstrados na figura 5.15. Como se pode verificar pelo gráfico da mesma, obteve-se um valor de  $\alpha = 0,17$ , que se aproxima bastante do valor teórico esperado ( $\alpha = 0,15$ ), para este tipo de terreno combinado com os pináculos grandes, sendo este valor experimental ainda da categoria do tipo de terreno 2, que era o que se pretendia simular. Obteve-se ainda um coeficiente de correlação,  $R^2 = 0.9791$ , que é um coeficiente bastante bom para simulação experimental.



**Figura 5.15- Ajuste de potência para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos grandes a  $x=4,10m$**

De seguida procedeu-se ao ajuste logarítmico do perfil de velocidades, mais uma vez repetindo os mesmos passos realizados no terreno anterior, obtendo-se o seguinte gráfico, representado na figura 5.16.



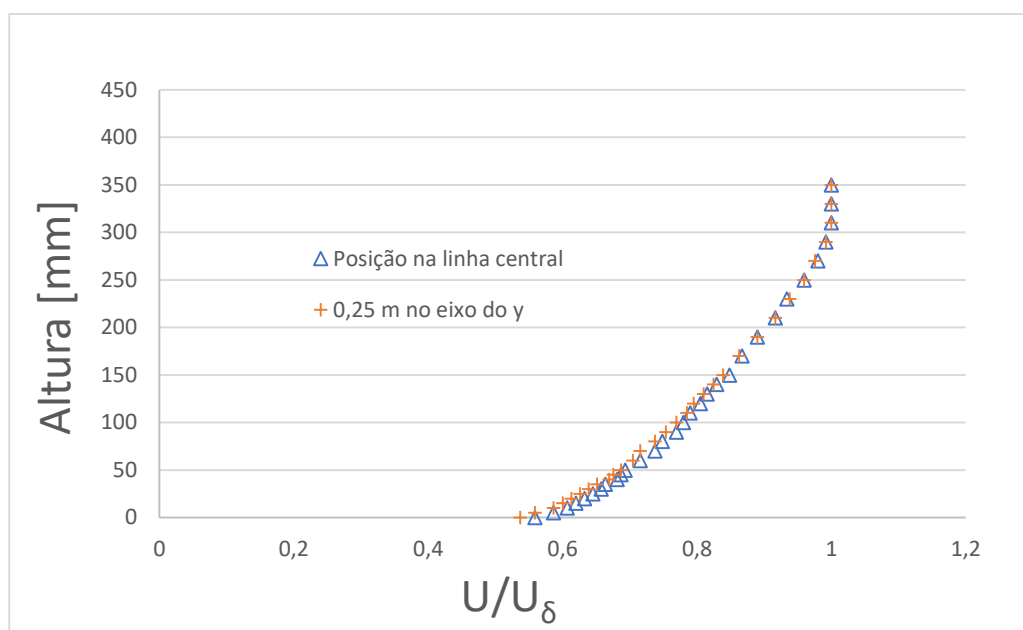
**Figura 5.16- Ajuste logarítmico para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos grandes a  $x=4,10m$**

Obteve-se assim para os valores experimentais  $z_0 = 0,000226m$  e um  $u^* = 1,382ms^{-1}$ . Através da referência bibliográfica [35], sabemos que para um tipo de terreno 2 na natureza se obtêm uma CLA com espessura de 270m. Para este tipo de terreno segundo a tabela 2.3, é suposto que  $z_0 = 0,5m$ . Assim realizando o mesmo procedimento, que o terreno anterior, obtemos o valor

teórico  $z_0 = 0,5 \times \left(\frac{0,560}{270}\right) = 0,000104m$ , podendo verificar-se que o valor teórico é bastante próximo do valor experimental obtido.

### 5.2.3 Ensaio experimental para terreno tipo 2 com pináculos pequenos

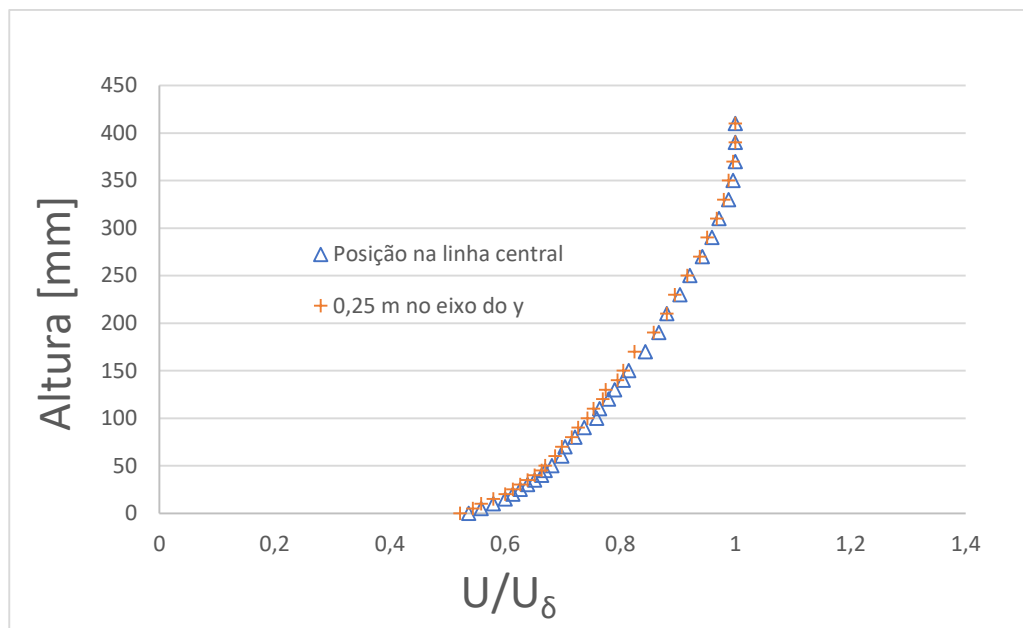
Por fim o último estudo a ser realizado foi o estudo para o tipo de terreno 2 com os pináculos pequenos, seguindo o mesmo procedimento dos dois estudos anteriores, obteve-se para os perfis de velocidades para a secção  $x = 2,10m$  e a  $y = 0,25m$ , estando estes perfis demonstrados no gráfico da figura 5.17



**Figura 5.17- Perfis de velocidade para  $x=2,10m$  na linha central e para  $x=2,10m$  e afastado  $0,25m$  no eixo do  $y$  com elementos  $k=0,01m$  e pináculos pequenos**

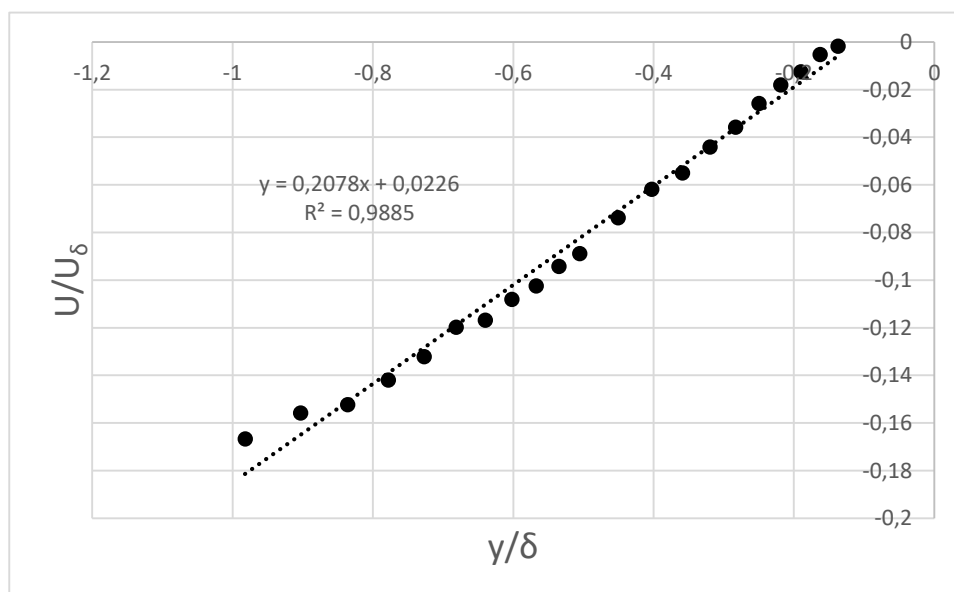
Do gráfico na figura 5.17, retira-se que a espessura da camada limite nesta secção tem o valor de  $\delta = 0,29m$  passando ligeiramente o valor teórico idealizado para a secção  $x = 4,10m$ .

Para a secção localizada em  $x = 4,10m$ , obteve-se o seguinte gráfico representado na figura 5.18. Neste gráfico encontra-se também representado o perfil de velocidades para  $x = 4,10m$  no eixo central e a  $y = 0,25m$ . Da análise gráfica rapidamente se verifica que se obteve uma espessura de camada limite de  $\delta = 0,35m$  que mais uma vez se encontra um pouco longe da camada limite idealizada em fase de projeto,  $\delta = 0,24m$ .



**Figura 5.18- Perfis de velocidade para  $x=4,10\text{m}$  na linha central e para  $x=4,10\text{m}$  e afastado  $0,25\text{m}$  no eixo do  $y$  com elementos  $k=0,01\text{m}$  e pináculos pequenos**

Repetindo o mesmo processo, nos estudos anteriores procedeu-se ao ajuste de potência dos perfis de velocidade, este encontra-se representado na figura 5.19.

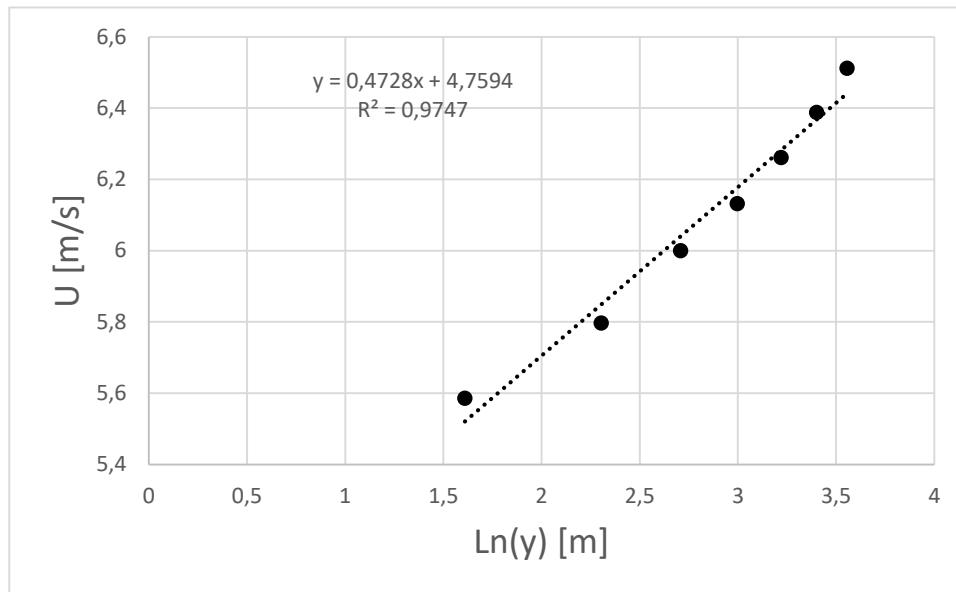


**Figura 5.19- Ajuste de potência para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos pequenos a  $x=4,10\text{m}$**

Como se pode verificar pelo gráfico da figura 5.19, obteve-se um valor de  $\alpha = 0,21$ , que se aproxima bastante do valor teórico esperado ( $\alpha = 0,18$ ), para este tipo de terreno combinado com os pináculos pequenos, no entanto, este tipo de  $\alpha$  já recai na categoria de terreno tipo 3, como se pode verificar pela tabela 2.2.



De seguida procedeu-se ao ajuste logarítmico do perfil de velocidades, mais uma vez repetindo os mesmos passos realizados nos terrenos anteriores, obtendo-se o seguinte gráfico, representado na figura 5.20.



**Figura 5.20- Ajuste logarítmico para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos pequenos a  $x=4,10m$**

Obteve-se assim para os valores experimentais  $z_0 = 0,0000425m$  e um  $u^* = 0,1891ms^{-1}$ . Sabendo que para um tipo de terreno 2 na natureza se obtêm uma CLA com espessura de  $270m$ . Mais uma vez, para este tipo de terreno segundo a tabela 2.3, é suposto que  $z_0 = 0,5m$ . Assim realizando o mesmo procedimento, que os terrenos anteriores, obtemos o valor teórico  $z_0 = 0,5 \times \left(\frac{0,350}{270}\right) = 0,0000648m$ , aproximando-se ligeiramente do valor esperado.

### 5.3 Coeficientes de pressão num edifício cúbico

Depois de se realizar os estudos dos perfis de velocidades gerados por cada tipo de terreno, procedeu-se ao estudo dos coeficientes de pressão (Cps), de um modelo cúbico de  $20 \times 20cm$ , introduzido a  $4,50m$  na direção  $x$  do túnel de vento. Numa zona onde a CLA já se encontraria totalmente desenvolvida, e o modelo totalmente imerso na CLA gerada. De modo a facilitar a análise dos cps, dividiu-se a análise em dois módulos, a análise da distância horizontal ao longo do cubo e a análise distância ao redor do cubo da face de barlavento. Uma vez que se tinha mais interesse em entender, com maior pormenor, o que se passava na zona inferior do modelo, e de modo a facilitar a leitura dos gráficos, optou-se por se retirar as leituras dos coeficientes de pressão das coordenadas  $y = 15cm$  e  $y = 17cm$  dos gráficos da distância horizontal ao longo do cubo. De notar ainda que nos gráficos da análise da distância ao redor do cubo da face de barla-

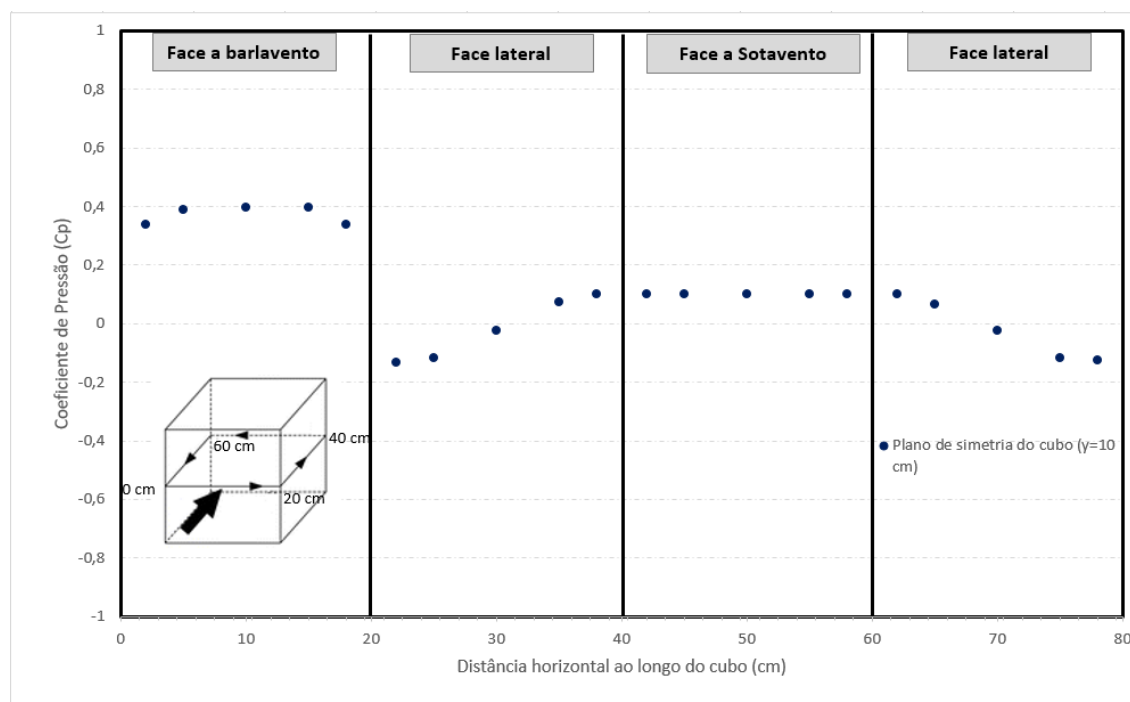
vento só estão representados os cps de metade do modelo cúbico, uma vez que os cps apresentavam valores simétricos. Na tabela 5.1 encontra-se um esquema das coordenadas dos cps presentes no modelo cúbico.

**Tabela 5.1- Esquema das coordenadas das tomadas de pressão no modelo cúbico**

Y=20 cm	A1	B1	C1	D1	E1
	X=2;Y=18,5	X=5;Y=18,5	X=10;Y=18,5	X=15;Y=18,5	X=18;Y=18,5
	A2	B2	C2	D2	E2
	X=2;Y=17	X=5;Y=17	X=10;Y=17	X=15;Y=17	X=18;Y=17
	A3	B3	C3	D3	E3
	X=2;Y=15	X=5;Y=15	X=10;Y=15	X=15;Y=15	X=18;Y=15
	A4	B4	C4	D4	E4
	X=2;Y=10	X=5;Y=10	X=10;Y=10	X=15;Y=10	X=18;Y=10
	A5	B5	C5	D5	E5
	X=2;Y=5	X=5;Y=5	X=10;Y=5	X=15;Y=5	X=18;Y=5
	A6	B6	C6	D6	E6
	X=2;Y=3	X=5;Y=3	X=10;Y=3	X=15;Y=3	X=18;Y=3
	A7	B7	C7	D7	E7
	X=2;Y=1,5	X=5;Y=1,5	X=10;Y=1,5	X=15;Y=1,5	X=18;Y=1,5
X=0cm; Y=0cm					X=20 cm

### 5.3.1 Leitura dos Cps para o tipo de terreno 4 com pináculos grandes

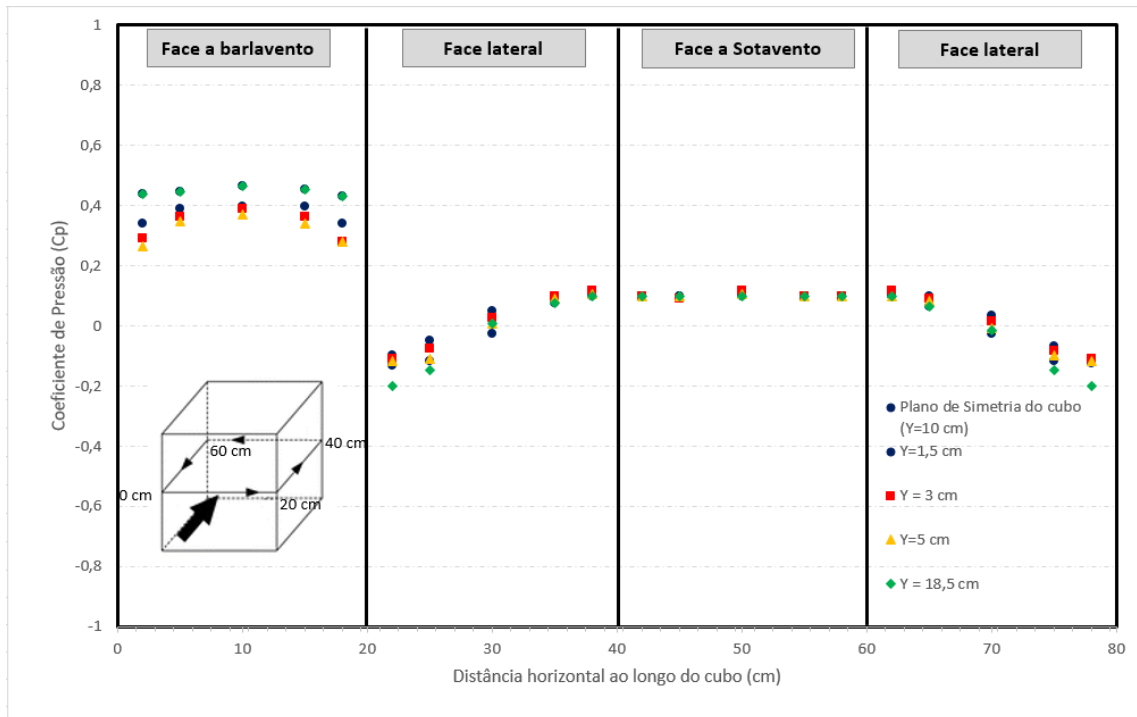
Na figura 5.21, encontra-se representado o gráfico de Cps para o terreno tipo 4 com pináculos grandes. Neste gráfico pode-se verificar o desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal.



**Figura 5.21- Desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 4**

Da figura 5.21, verifica-se que na face de barlavento, o  $C_p$  mais elevado encontra-se na zona central do cubo, na cota  $x = 10\text{cm}$ . Retira-se ainda que os cps das faces laterais apresentam valores simétricos, e observa-se que o recolamento do escoamento se deu a meio do modelo cúbico na cota  $x = 10\text{cm}$ . Para a face a sotavento verifica-se uma uniformidade dos valores dos  $C_p$ s obtidos.

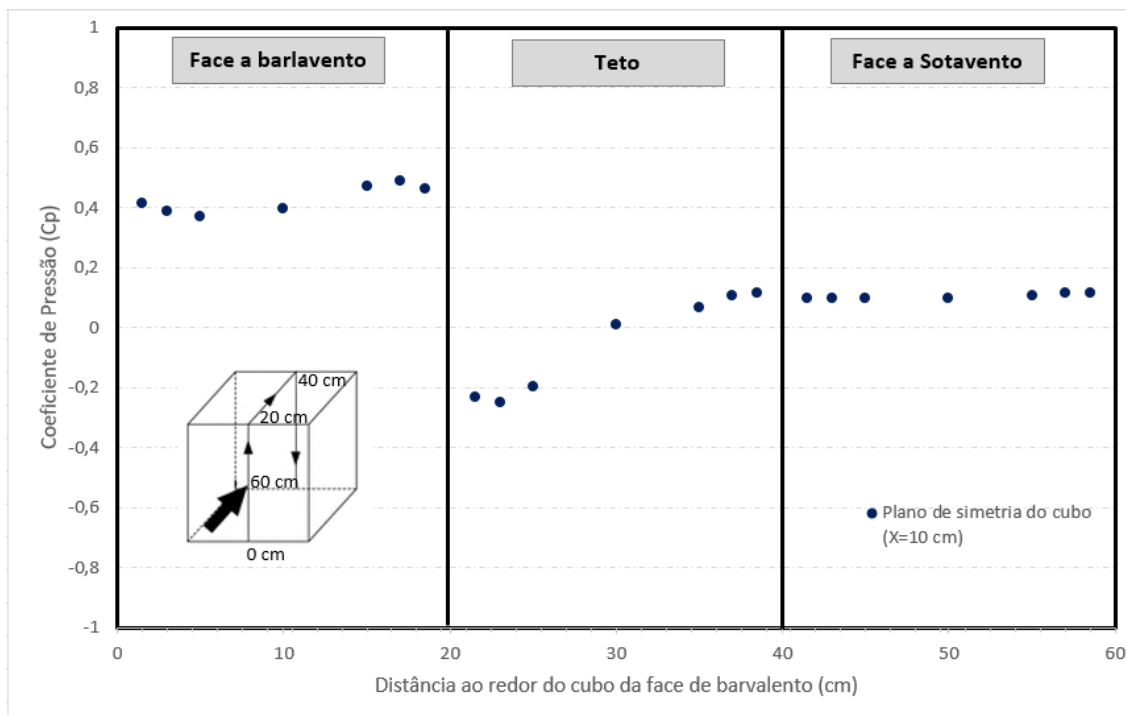
Na figura 5.22 encontra-se a comparação dos vários  $C_p$ s, para diferentes pontos do cubo ao longo do seu eixo do  $y$ .



**Figura 5.22- Desenvolvimento dos  $C_p$ s para diferentes pontos de  $y$  ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 4**

Pela análise da figura 5. 22, conclui-se que se obteve  $C_p$ s mais elevados na face de barlavento na cota  $y = 18,5\text{cm}$  sendo este a meio do cubo. Mais uma vez se verifica simetria entre as faces laterais do modelo, obtendo-se valores de  $C_p$ s inferiores na conta  $y = 18,5\text{cm}$  em comparação às outras cotas de  $y$ . De notar ainda que nas faces laterais o recolamento foi uniforme ao longo das cotas  $y$ , e verificou-se exatamente a meio do cubo. Mais uma vez se pode verificar que na face a sotavento os  $C_p$ s são constantes ao logo da cota  $x$  para as diferentes cotas  $y$ .

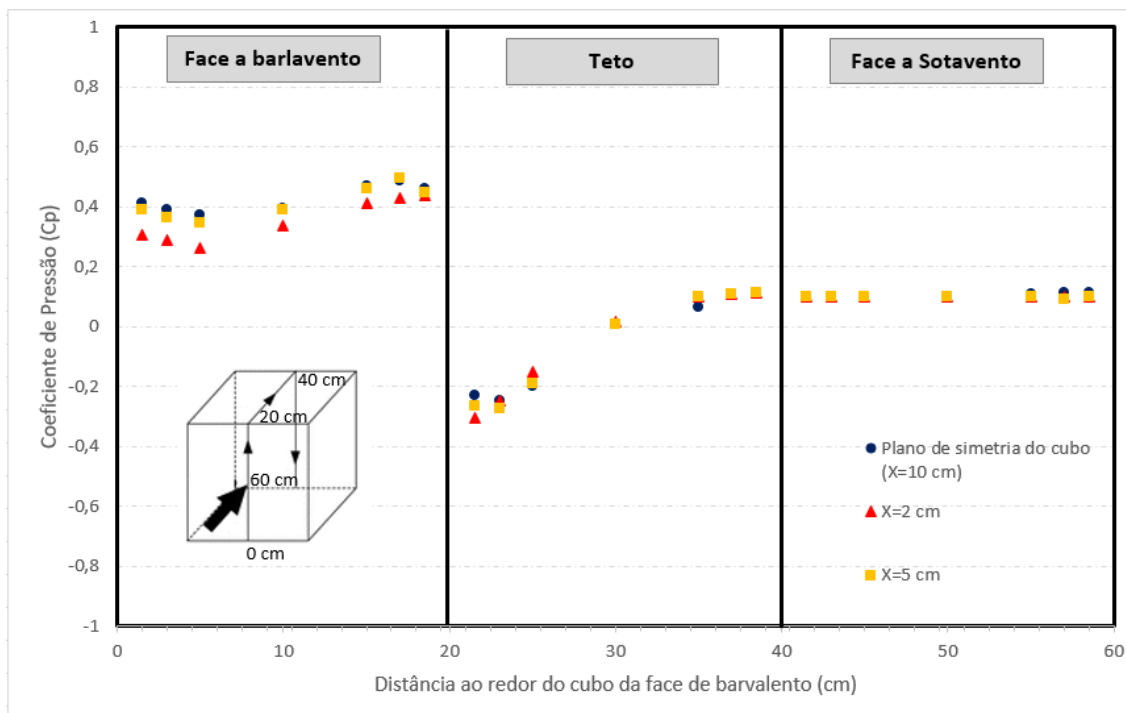
Na figura 5.23 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos  $C_p$ s ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento.



**Figura 5.23- Desenvolvimento dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo 4**

Da análise da figura 5.23 conclui-se que na face a barlavento se obteve um Cp mais elevado na cota  $y = 17\text{cm}$ . Na face do tecto verifica-se um recolamento do escoamento a meio da mesma na cota  $y = 10\text{cm}$ . Já na face a sotavento mais uma vez se verifica a uniformidade dos valores de Cps ao longo da face.

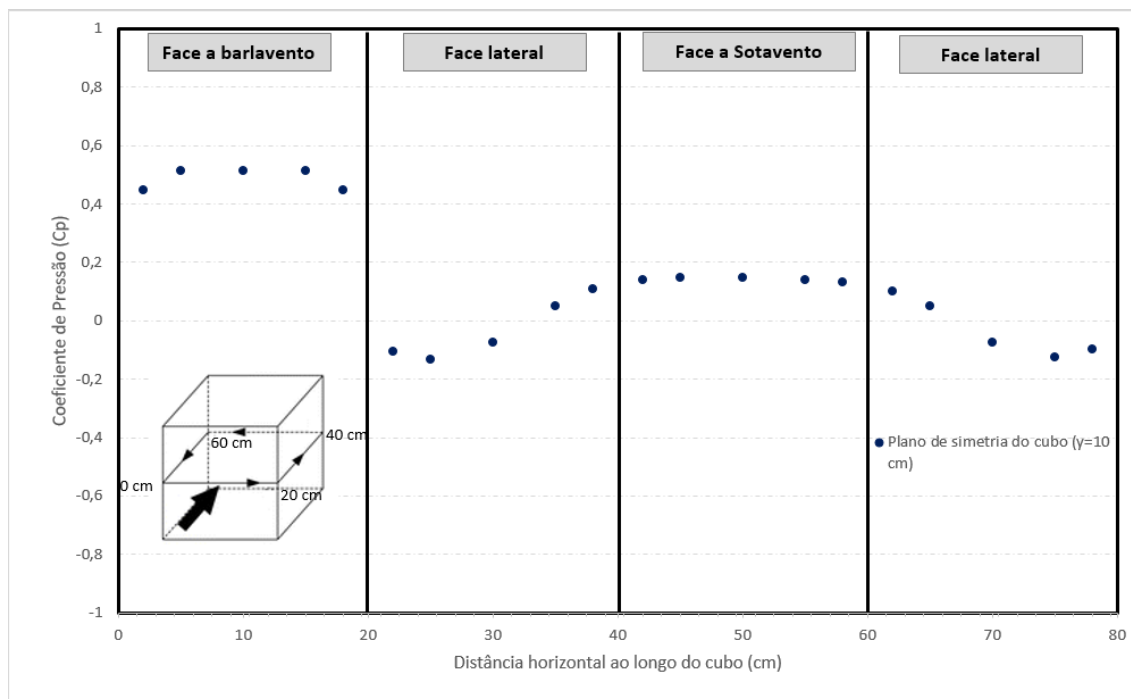
Na figura 5.24 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento, para vários valores de  $x$ . Nesta verifica-se um decréscimo dos valores dos Cps na cota  $x = 2\text{cm}$  na face a barlavento. No entanto observa-se ainda que os cps na cota do  $x = 5\text{cm}$  apresentam valores semelhantes aos obtidos na cota  $x = 10\text{cm}$ . Para a face do tecto, observa-se que na cota  $y = 1,5\text{cm}$  os valores do cp são ligeiramente superiores na cota  $x = 10\text{cm}$  em comparação às outras cotas de  $x$ . Observa-se o recolamento do escoamento na cota  $y = 10\text{cm}$  e verifica-se que é uniforme para todas as cotas de  $x$ . Na face a sotavento mais uma vez se observou uma uniformidade nos valores de cps obtidos ao longo do eixo do  $y$  e do eixo do  $x$ .



**Figura 5.24 Desenvolvimento dos Cps para vários valores de x na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo 4**

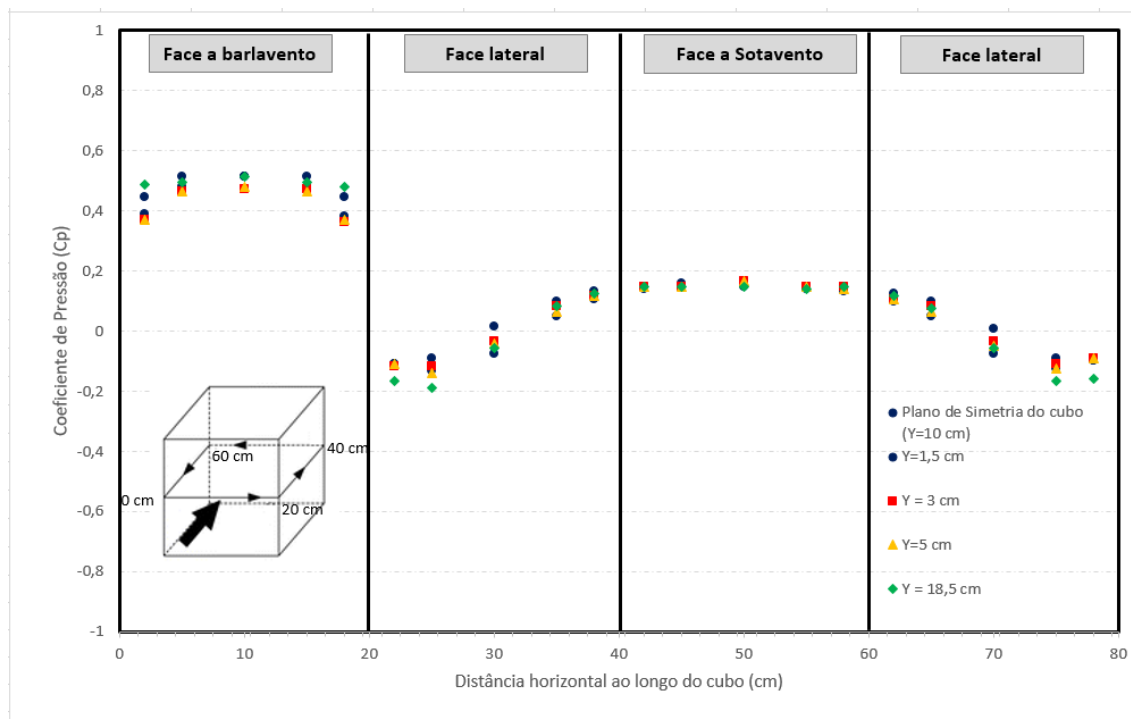
### 5.3.2 Leitura dos Cps para o terreno de tipo 2 com pináculos grandes

Na figura 5.25, encontra-se representado o gráfico de Cps para o terreno tipo 2 com pináculos grandes. Neste gráfico pode-se verificar o desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal. Desta figura, verifica-se que na face de barlavento, que o Cps mais elevados partilham dos mesmos valores e encontra-se nas cotas,  $x = 5$ ,  $x = 10$  e  $x = 15$ . Retira-se ainda que os cps das faces laterais apresentam valores simétricos, e observa-se que o recolamento do escoamento se deu entre as cotas  $x = 10\text{cm}$  e  $x = 15\text{cm}$ . Para a face a sotavento verifica-se uma uniformidade dos valores dos Cps obtidos.



**Figura 5.25- Desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 2 com pináculos grandes**

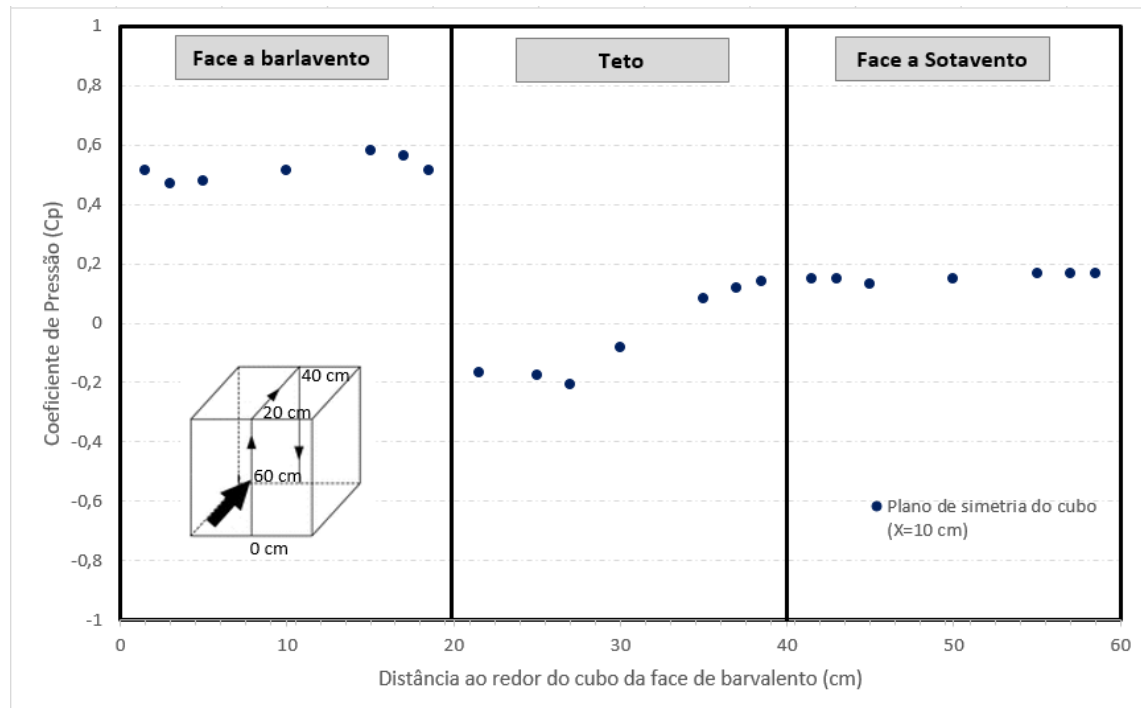
Na figura 5.26 encontra-se a comparação dos vários Cps, para diferentes pontos do cubo ao longo do seu eixo do y.



**Figura 5.26- Desenvolvimento dos Cps para diferentes pontos de y ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 2 com pináculos grandes**

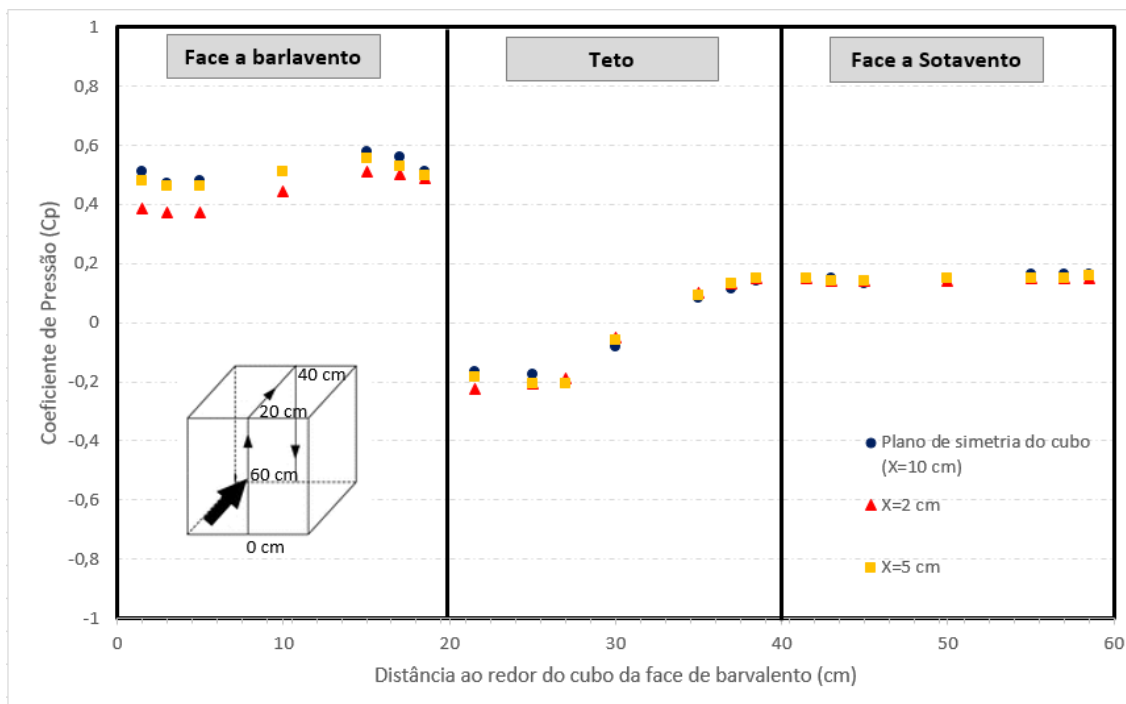
Da análise da figura 5. 26, verifica-se mais uma vez os Cps mais elevados se encontram nas cotas  $x = 5\text{cm}$ ,  $x = 10\text{cm}$  e  $x = 15\text{cm}$ . Sendo que para a cota  $x = 10\text{cm}$  os valores dos cps são semelhantes entre as cotas  $y = 10\text{cm}$  e  $y = 18,5\text{cm}$ . Mais uma vez se verifica simetria entre as faces laterais do modelo, obtendo-se valores de cps inferiores na conta  $y = 18,5\text{cm}$  em comparação às outras cotas de  $y$ . De notar ainda que nas faces laterais o recolamento foi uniforme ao longo das cotas  $y$ , e verificou-se exatamente a meio do cubo, obtendo-se no entanto Cps mais baixos para a secção inferior do cubo. Mais uma vez se pode verificar que na face a sotavento os Cps são constantes ao logo da cota  $x$  para as diferentes cotas  $y$ .

Na figura 5.27 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento. Desta observou-se que na face a barlavento se obteve um Cp mais elevado na cota  $y = 15\text{cm}$ . Na face do tecto verifica-se um recolamento do escoamento entre a cota  $y = 10\text{cm}$  e  $y = 15\text{cm}$ . Nesta face observou-se ainda um decréscimo no valor do Cp na cota  $y = 5\text{cm}$ . Já na face a sotavento mais uma vez se verifica uma ligeira uniformidade dos valores de Cps ao longo da face.



**Figura 5.27- Desenvolvimento dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo e pináculos grandes**

Na figura 5.28 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento, para vários valores de  $x$ .



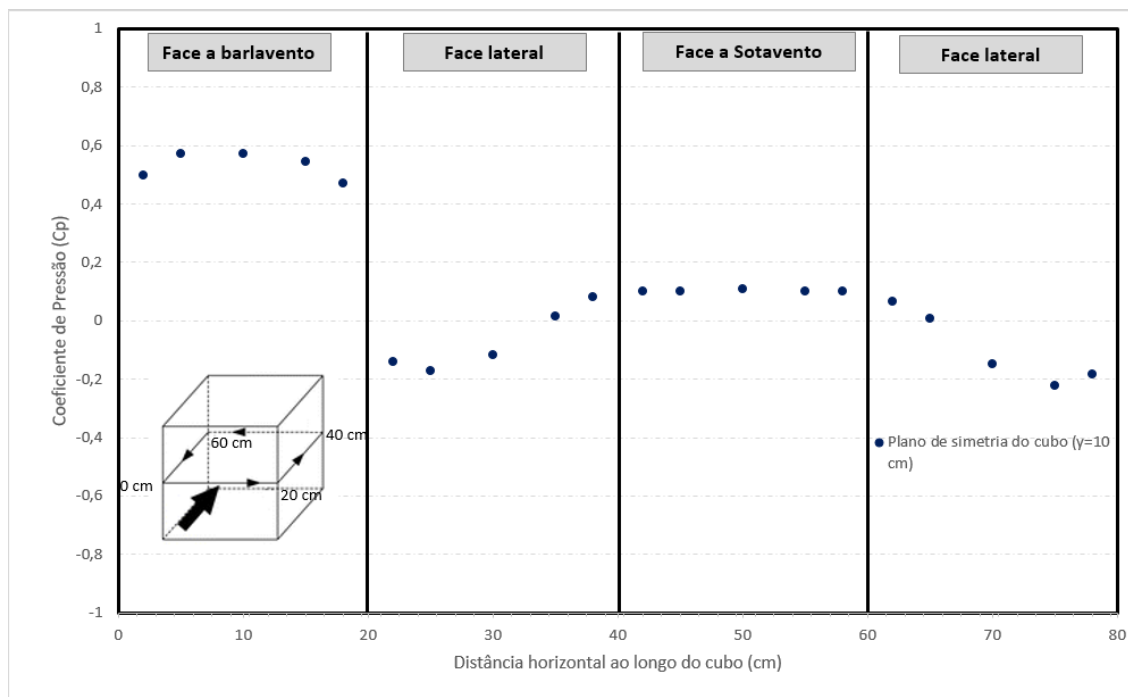
**Figura 5.28- Desenvolvimento dos Cps para vários valores de x na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo e pináculos grandes**

Da figura anterior observa-se um decréscimo dos valores dos Cps na cota  $x = 2\text{ cm}$  na face a barlavento. No entanto verifica-se uma semelhança nos cps obtidos na cota  $x = 5\text{ cm}$  bem como na cota  $x = 10\text{ cm}$ . Para a face do teto, observa-se que na cota  $y = 1,5\text{ cm}$  o valor do cp é ligeiramente inferior para a cota  $x = 2\text{ cm}$  em comparação às outras cotas de x. Observa-se o recolamento do escoamento ligeiramente depois da cota  $y = 10\text{ cm}$  e verifica-se que é uniforme para todas as cotas de x. Na face a sotavento mais uma vez se observou uma uniformidade nos valores de cps obtidos ao longo do eixo do y e do eixo do x.

### 5.3.3 Leitura dos Cps para o terreno tipo 2 para pináculos pequenos

Na figura 5.29, encontra-se representado o gráfico de Cps para o terreno tipo 2 com pináculos pequenos. Neste gráfico pode-se verificar o desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal.

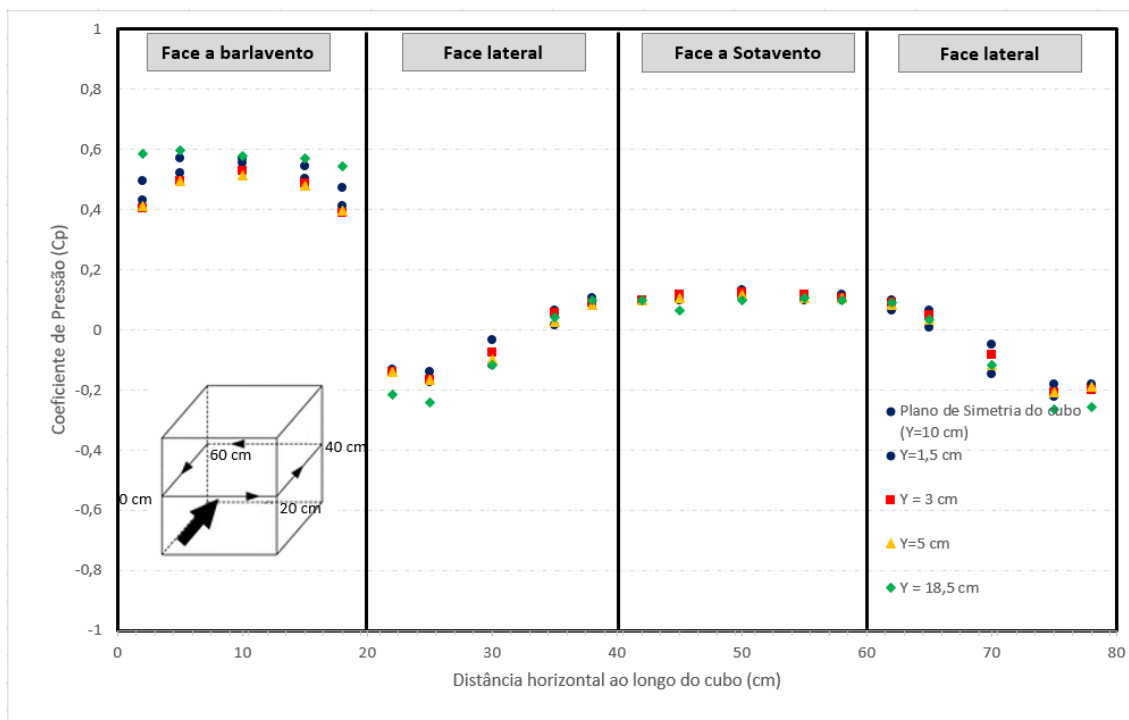




**Figura 5.29- Desenvolvimento dos Cps do plano de simetria do cubo ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 2 com pináculos pequenos**

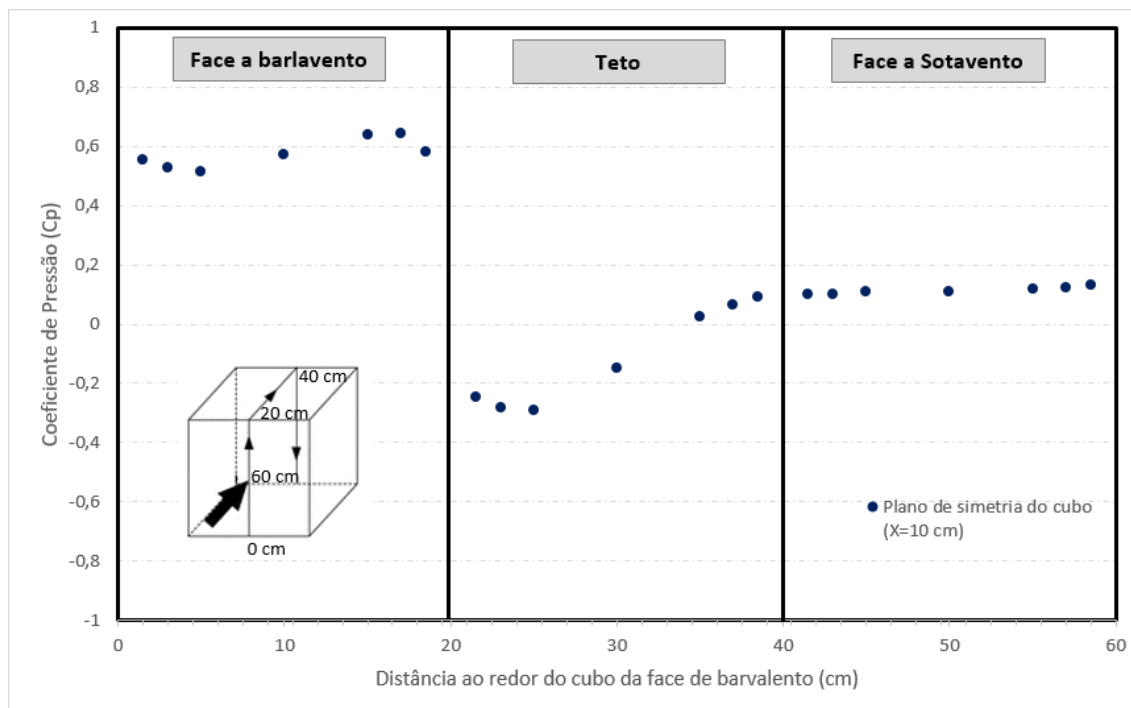
Da figura 5.29, verifica-se que na face de barlavento, os Cps mais elevados encontram-se na cota  $x = 5\text{cm}$  e  $x = 10\text{cm}$ , sendo que na cota  $x = 15\text{cm}$ , o valor do cp não apresenta simetria segundo a cota  $y = 10\text{cm}$ . Quanto às faces laterais observa-se que os Cps apresentam valores simétricos, e verifica-se ainda que o recolamento do escoamento se deu próximo na cota  $x = 15\text{cm}$ . Para a face a sotavento verifica-se uma uniformidade dos valores dos cps obtidos.

Na figura 5.30 encontra-se a comparação dos vários Cps, para diferentes pontos do cubo ao longo do seu eixo do y. Pela análise da figura 5. 30, não se verifica simetria pela cota  $x = 10\text{cm}$  nas cotas  $y = 10\text{cm}$  e conta  $y = 18,5\text{cm}$  na face a barlavento. Mais uma vez se verifica simetria entre as faces laterais do modelo, obtendo-se valores de Cps inferiores na conta  $y = 18,5\text{cm}$  em comparação às outras cotas de y. De notar ainda que nas faces laterais o recolamento foi uniforme ao longo das cotas y, e verificou-se entre a cota  $x = 10\text{cm}$  e  $x = 15\text{cm}$ . Mais uma vez se pode verificar que na face a sotavento os cps são constantes ao logo da cota x para as diferentes cotas y.



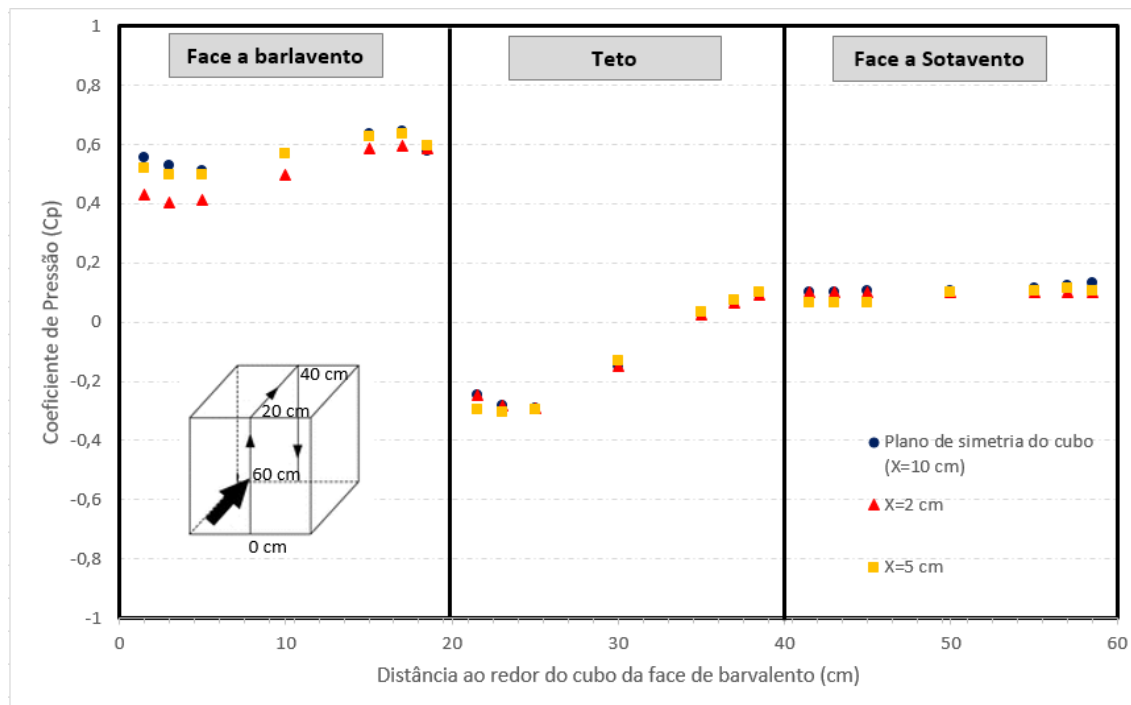
**Figura 5.30- Desenvolvimento dos Cps para diferentes pontos de y ao longo da sua distância horizontal, para terreno de tipo 2 com pináculos pequenos**

Na figura 5.31 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos Cps ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento. Desta observou-se que na face a barlavento se obteve um Cp mais elevado na cota  $y = 17\text{ cm}$ . Na face do tecto verifica-se um recolamento do escoamento próximo da cota  $y = 15\text{ cm}$ . Nesta face observou-se ainda um decréscimo no valor do cp na cota  $y = 5\text{ cm}$ . Já na face a sotavento mais uma vez se verifica uma ligeira uniformidade dos valores de Cps ao longo da face.



**Figura 5.31- Desenvolvimento dos  $C_p$ s ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo e pináculos pequenos**

Na figura 5.32 encontra-se o gráfico que representa a leitura dos  $C_p$ s ao longo do plano de simetria do cubo na distância ao redor da face de barlavento, para vários valores de  $x$ .



**Figura 5.32- Desenvolvimento dos  $C_p$ s para vários valores de  $x$  na distância ao redor da face de barlavento para terreno tipo e pináculos pequenos**

Da figura anterior observa-se um decréscimo dos valores dos Cps na cota  $x = 2cm$  na face a barlavento. No entanto verifica-se uma semelhança nos cps obtidos na cota  $x = 5cm$  bem como na cota  $x = 10cm$ . Na face de teto observa-se o recolamento do escoamento próximo da cota  $y = 15cm$  e verifica-se que é uniforme para todas as cotas de  $x$ . Na face a sotavento mais uma vez se observou uma ligeira uniformidade nos valores de Cps obtidos ao longo do eixo do  $y$  e do eixo do  $x$ .

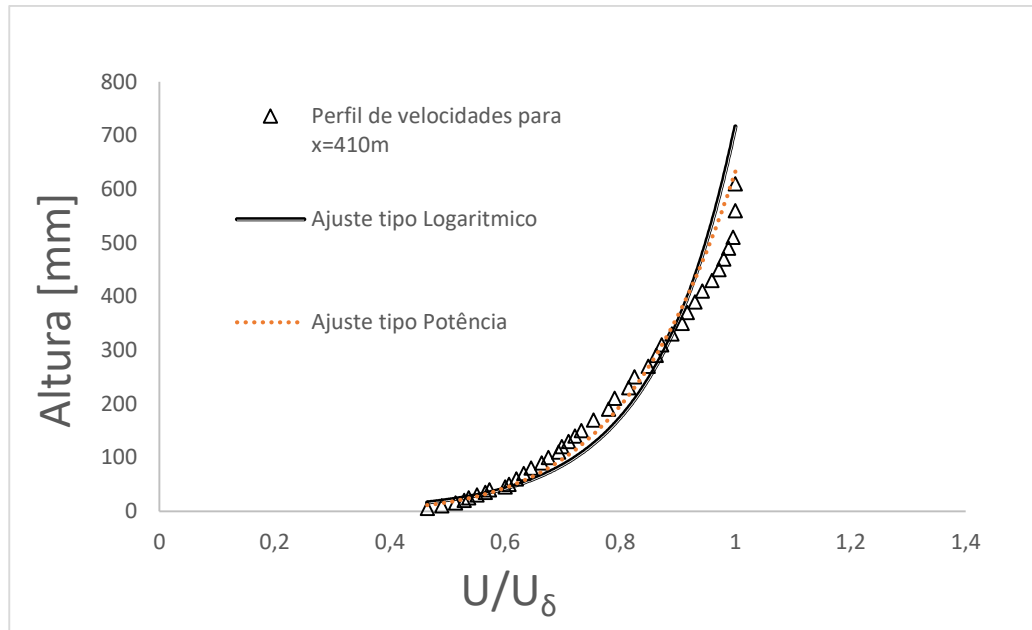
#### 5.4 Discussão de resultados

Nesta secção irá proceder-se a uma breve discussão dos vários resultados obtidos, de forma a entender o seu significado científico.

##### Tipo de terreno 4 com pináculos grandes

Para o tipo de terreno 4 com pináculos grandes, os resultados obtidos foram de encontro ao que tinha sido projetado, tendo-se igualado o valor experimental da espessura da CLA ao valor teórico de projeto. Do ajuste de potência foi possível retirar o valor  $\alpha$ , embora este não tenha sido igual ao valor idealizado na fase de projeto (15% inferior que o valor  $\alpha = 0,32$  para um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,9959$ ), continua a ser um valor bastante próximo do valor alvo, sendo este ainda na categoria de terreno tipo 4. Os resultados experimentais foram ainda ajustados à lei do tipo logarítmico, onde se obtiveram os seguintes parâmetros,  $u^* = 1,52 \text{ ms}^{-1}$  e  $z_0 = 0,0029m$ . Como se verificou na secção 5.2.1, este valor é bastante próximo do valor teórico que se deveria obter de  $z_0 = 0,0023m$ , no entanto para se entender se esta relação é aceitável é frequente recorrer-se ao número de Jensen. Este é obtido através do quociente entre a espessura da CLA ( $\delta$ ) e a escala de rugosidade ( $z_0$ ), sendo uma medida não-dimensional da rugosidade aerodinâmica. Realizando o quociente entre ambos os números de Jensen do modelo e do protótipo, obtemos o seguinte valor para este tipo de terreno,  $\frac{\frac{450}{2}}{\frac{0,51}{0,0029}} = 1,28$ . A rugosidade de terreno é considerada adequadamente reproduzida quando o quociente entre os números de Jensen é inferior a 3 [31].

Na figura 5.33 encontra-se um gráfico com os ajustes lineares de potência e logarítmico, para o perfil de velocidades obtido para este terreno.



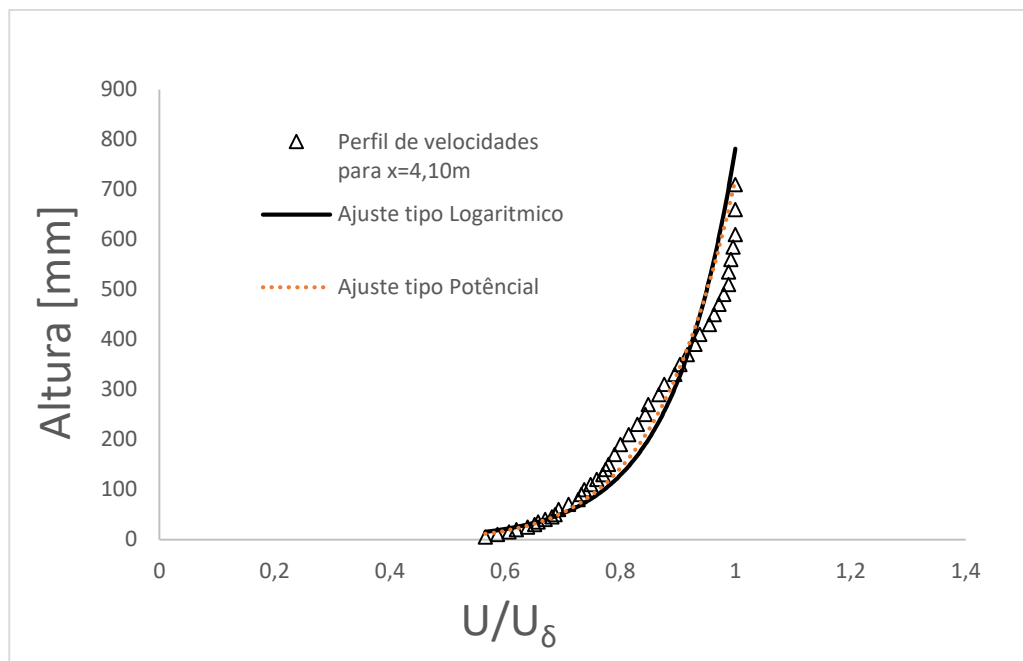
**Figura 5.33- Ajuste de potência linear e logarítmico linear, para  $\alpha=0,28$**

Como se pode verificar através do gráfico da figura 5.33, obtêm-se um melhor ajuste logarítmico para os pontos a cerca de 10 a 20% da espessura da camada limite. Já para o ajuste de potência de  $\alpha = 0,27$ , verifica-se um bom ajuste ao longo de toda a CLA.

#### **Tipo de terreno 2 com pináculos grandes**

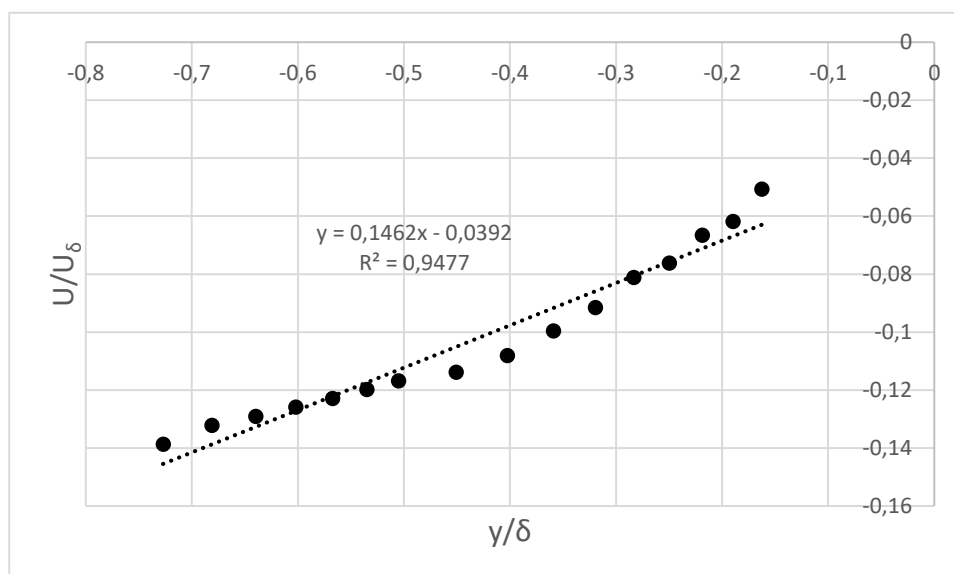
Para o tipo de terreno 2 com pináculos grandes obteve-se uma espessura de CLA, de  $\delta = 0,56m$  (21% mais alto que o valor de projeto de  $\delta = 0,48m$ ). Do ajuste de potência realizado a este perfil de velocidades obteve-se o valor de  $\alpha = 0,17$  (13% superior ao valor idealizado em fase de projeto  $\alpha = 0,15$ ), para um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,9791$ , no entanto este ainda se encontra dentro do terreno de tipo 2 que era o que se pretendia estudar. Os resultados experimentais para o ajuste logarítmico foram,  $u^* = 1,382 \text{ ms}^{-1}$  e  $z_0 = 0,000226m$ . Para este valor de  $z$ , procedeu-se ao cálculo dos números de Jensen do modelo e do protótipo respetivamente, obtendo-se  $\frac{0,56}{0,000226} = 2477,88$  e  $\frac{270}{0,05} = 5400$ , realizando o quociente dos valores anteriores,  $\frac{5400}{2477,88} = 2,18$ , que é inferior a 3 segundo a literatura, validando os resultados obtidos.

Na figura 5.34 encontra-se um gráfico com os ajustes lineares de potência e logarítmico, para o perfil de velocidades obtido para este terreno.



**Figura 5.34- Ajuste de potência linear e logarítmico linear, para  $\alpha=0,17$**

A elevada discrepância entre os valores de espessura de CLA pode advir do facto, de os limites da fórmula 4.12 introduzidos por Irwin não serem cumpridos para esta combinação de elementos de rugosidade e pináculos. No entanto, como referido anteriormente, decidiu-se continuar com os estudos de modo a entender o que aconteceria se tais limites não fossem cumpridos. Da análise da figura 5.12, pode-se verificar que a CLA experimental obtida foi de  $\delta = 0,45m$  (6% inferior ao valor de projeto  $\delta = 0,48m$ ). Tendo em conta este valor, decidiu-se fazer um ajuste do tipo de potência para o perfil de velocidades a  $x = 2,10m$ , de modo a verificar qual o valor de  $\alpha$  que se obteria. Este encontra-se na figura 5.35.



**Figura 5.35- Ajuste de potência para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos grandes a  $x=2,10m$**

Da análise da figura 5.35, observa-se que para este perfil de velocidades se obteve um valor de  $\alpha = 0,15$  (para um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,9477$ ), que era o valor de projeto para a secção  $x = 4,10m$ . Para o caso de ajuste logarítmico, optou-se por não se realizar para este perfil de velocidades, uma vez que nesta secção a CLA ainda não se encontrar totalmente desenvolvida, e a lei logarítmica ajusta-se melhor na camada sub viscosa da CLA.

Destes dados, pode-se verificar que talvez não seja necessário uma secção de túnel de vento tão grande para se produzir uma CLA espessa, no entanto, mais estudos teriam de ser realizados uma vez que neste trabalho foi impossível verificar a turbulência que se fazia produzir no escoamento.

### Tipo de terreno 2 com pináculos pequenos

Para o estudo de terreno tipo 2 com pináculos pequenos obteve-se uma espessura de CLA de  $\delta = 0,35m$  (46% superior ao valor de projeto  $\delta = 0,24m$ ). Para o ajuste de potência deste perfil de velocidades obteve-se um  $\alpha = 0,21$  (17% superior ao valor de projeto  $\delta = 0,18$ ), para um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,9885$ . Este valor já recai na categoria de terreno tipo 3 segundo a tabela 2.2. Para o ajusto logarítmico deste perfil de velocidades, obteve-se  $u^* = 0,1891ms^{-1}$  e  $z_0 = 0,0000425m$ . À semelhança dos terrenos anteriores procedeu-se ao cálculo dos números de Jensen do modelo e do protótipo, obtendo-se  $\frac{270}{0,05} = 5400$  e  $\frac{0,35}{0,0000425} = 8235,29$ , respetivamente. Procedendo ao cálculo do quociente obteve-se  $\frac{5400}{8235,29} = 0,66$ , validando os resultados obtidos.

Na figura 5.36 encontra-se um gráfico com os ajustes lineares de potência e logarítmico, para o perfil de velocidades obtido para este terreno.

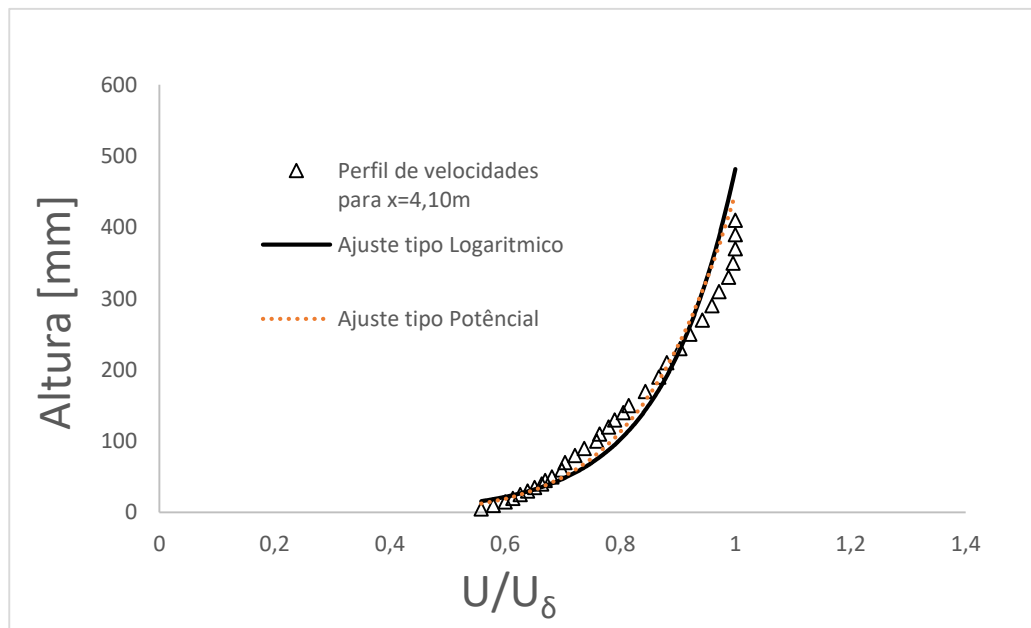
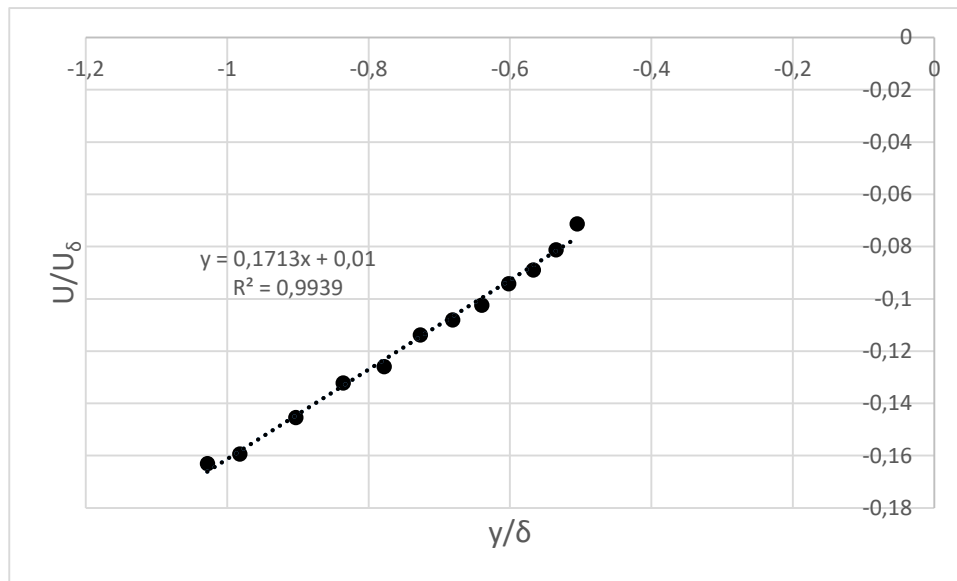


Figura 5.36- Ajuste de potência linear e logarítmico linear, para  $\alpha=0,21$

Mais uma vez, verificou-se uma discrepância elevada entre os valores da espessura da camada limite. Apesar da combinação destes elementos de rugosidade em conjunto com os novos pináculos, continuar a encontrar-se fora dos limites propostos por Irwin, esta mesma combinação estaria dentro dos limites propostos por outros autores. No entanto verificou-se um acontecimento semelhante ao que tinha acontecido para o tipo de terreno 2 com pináculos grandes. Da figura 5.16, verifica-se que a espessura da CLA para a secção  $x = 2,10m$  apresenta o valor de  $\delta = 0,29m$  (21% superior ao valor de projeto  $\delta = 0,24m$ ). Embora continue a ser um pouco distante do valor pretendido, verifica-se que a espessura de CLA idealizada em fase de projeto foi atingida antes da secção desejada. À semelhança do que foi realizado no terreno anterior, procedeu-se ao ajuste de potência para este perfil de velocidades. Este encontra-se representado na figura 5.37.



**Figura 5.37- Ajuste de potência para o perfil de velocidades de tipo de terreno 2 com pináculos pequenos a  $x=2,10m$**

Do gráfico da figura 5.37, retira-se assim o valor de  $\alpha = 0,17$  (5% abaixo do valor de projeto  $\alpha = 0,18$ ), para um coeficiente de correlação de  $R^2 = 0,9939$ . Este valor, como se pode constatar, é um valor bastante próximo do idealizado em fase de projeto.

Para todos os perfis de velocidades obtidos, pode-se reparar uma ligeira diferença entre os perfis obtidos na linha central do túnel aerodinâmico e os perfis obtidos nas secções deslocadas  $0,25m$  no eixo, isto pode ser explicado, pela interação com as paredes envidraçadas do túnel de vento, que afetam ligeiramente o escoamento sendo isso também notório nos valores da CLA obtidos.

### **Discussão dos Cps obtidos**

Para a validação dos diferentes Cps obtidos para cada tipo de terreno, procedeu-se à revisão bibliográfica de vários estudos semelhantes em modelos cúbicos. Na tabela 5.2, encontram-se alguns destes mesmos estudos, de notar que H corresponde à altura do modelo cúbico.



**Tabela 5.2- Vários estudos com o foco no estudo dos Cps num modelo cúbico (tabela baseada de [36])**

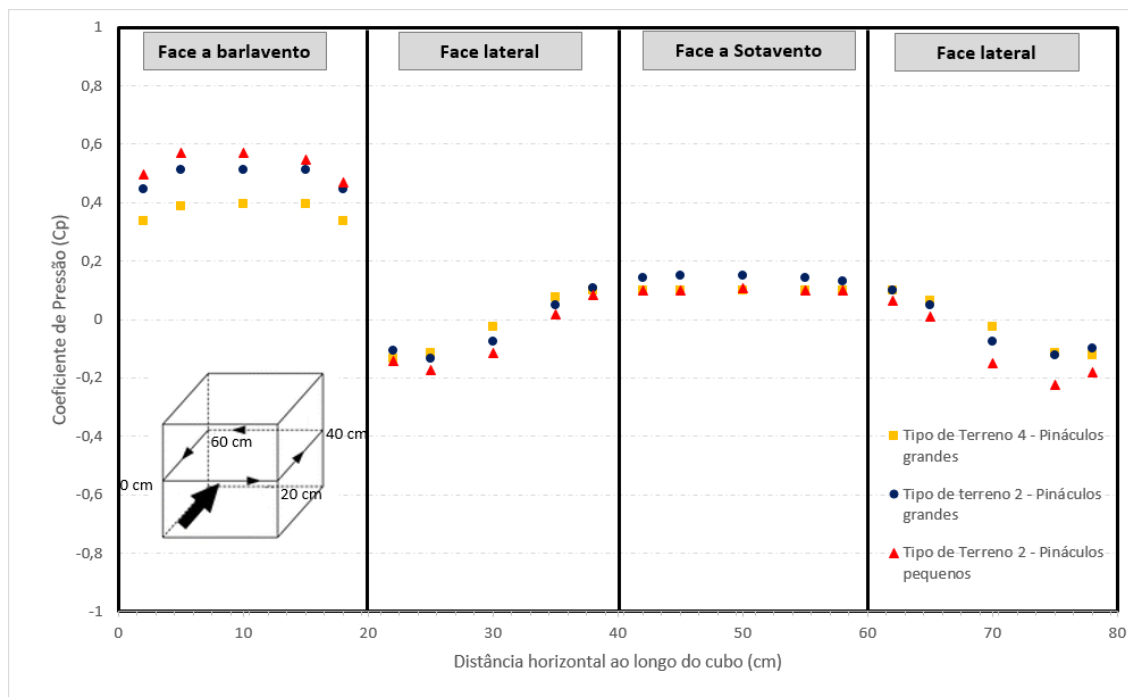
	Estudos	Localização do maior valor de $C_p$ positivo na face de barlavento do cubo	Localização do maior valor de $C_p$ negativo teto do cubo	Localização do maior valor de $C_p$ negativo na face a sotavento do cubo
Simulação Numérica	Irtza et al.[37] Standard $k - \varepsilon$	1.3 a 0,8 H	-0.8 a 0.1 H	-0.2 a 0.9 H
	Irtza et al.[37] RGN $k - \varepsilon$	1.15 a 0.7H	-0.9 a 0.1 H	-0.15 a 0.9 H
	Irtza et al.[37] Realizable $k - \varepsilon$	1.15 a 0.8H	-0.8 a 0.1 H	-0.15 a 0.8 H
	Irtza et al.[37] RSM	1.1 a 0.7H	-0.8 a 0.1 H	-0.2 a 0.2 H
	Irtza et al.[37] LES	0.82 a 0.6H	-0.9 a 0.1 H	-0.27 a 0.9 H
Experiência em túnel de vento	Irtza et al.[37]	0.9 a 0,7H	-0.9 a 0.25 H	-0.4 a 0.95H
	Castro e Robins [38]	0.78 a 0.85H	-0.9 a 0.1 H	-0.1 a 1H
	Holscher e Niemann [39]	0.87 a 0.75H	-1 a 0,27H	-0.2 a 1H
	Richard et al. [40]	0.75 a 0.81H	-1.1 a 0.2H	-0.2 a 1H

Posto isto, verificando os Cps obtidos para o cubo no terreno tipo 4 com pináculos grandes da figura 5.23, tem-se que  $C_p = 0.50$  para 0.85H, para a face a barlavento. Consultando a tabela 5.3, rapidamente se conclui que a secção onde este valor foi obtido assemelha-se aos valores obtidos tanto em estudos de túnel de vento como em simulação numérica. Para a face do tecto verificou-se um  $C_p = -0.31$  para 0.075H, que mais uma vez não se encontra muito distante do valor de 0.1H presente na bibliografia.

Para o terreno de tipo 2 com pináculos grandes pode-se verificar pela figura 5.27, que o  $C_p$  máximo positivo, teve o valor de  $C_p = 0.58$  para 0,75H para a face a barlavento e  $C_p = -0.22$  para 0,075H. Mais uma vez ambas as localizações coincidiram com a bibliografia.

Para o terreno de tipo 2 com pináculos pequenos, verifica-se na figura 5.31 que  $C_p = 0.64$  para 0,85H para a face a barlavento, e para a face do teto  $C_p = -0,33$  para 0,075H.

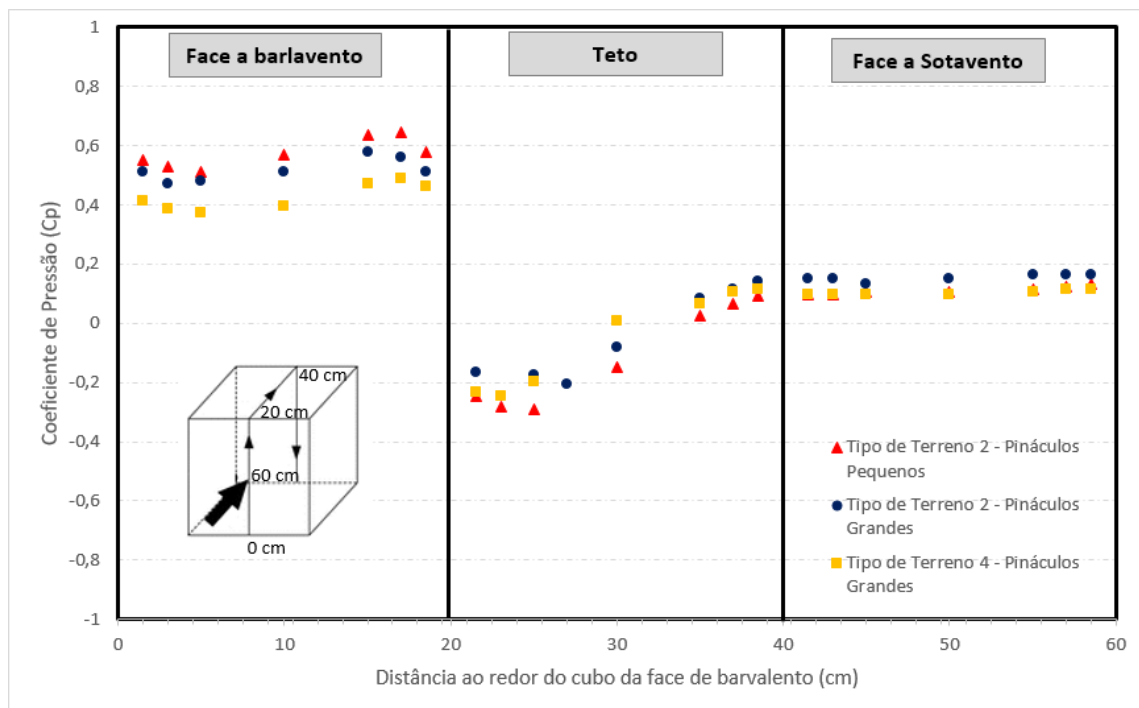
Apesar dos valores máximos positivos e negativos, dos Cps obtidos não serem próximos dos valores obtidos pela literatura, pode-se observar que a distribuição dos mesmos, corresponde à mesma distribuição presente na literatura.



**Figura 5.38- Comparação dos Cps obtidos para os três casos de estudo ao longo da distância horizontal do cubo**

Na figura 5.38 e 5.39, encontra-se uma comparação dos Cps obtidos para os três casos de estudo, rapidamente se verifica que para a face a barlavento, se obtiveram valores de Cps positivos, superiores aos outros dois experimentos, para o terreno tipo 2 com pináculos pequenos. Isto pode advir do facto, de a espessura de CLA ser menor para este estudo, sendo que as velocidades serão superiores ao embater nesta face do cubo.

Também se verifica uma certa uniformidade nos valores dos Cps obtidos para a face a sotavento nos três estudos realizados. Sendo que os valores dos mesmos, são positivos, o que contraria a literatura presente na tabela 5.3. A explicação para este fenómeno, pode vir do rácio de blocagem. O rácio de blocagem, diz que, para estudos aerodinâmicos, a área do objeto em estudo, tem de ser inferior a 3% da área molhada da secção de estudo, no entanto certos autores defendem que o rácio de blocagem deve ser inferior a 1,5% [41][42][43]. Para o nosso caso temos uma área molhada de túnel de vento de  $1 \times 1,5 = 1,5m^2$ , e temos uma área frontal do modelo cúbico de  $0,20 \times 0,20 = 0,04m^2$ , donde  $\frac{0,04}{1,5} \times 100 = 2,67\%$ . No entanto, segundo, [44], para os valores de rácio de blocagem ideais teríamos de ter uma relação de área do cubo com área da secção molhada de 3%, e o quociente entre o lado y do túnel e um lado do cubo seja inferior a 17% e o quociente entre o lado z do túnel e um lado do cubo também tem de ser 17%. Tendo isto em consideração temos que  $\frac{0,20}{1,50} \times 100 = 13,3\%$  e  $\frac{0,20}{1,00} \times 100 = 20\%$ . Tendo em conta estes dados, pode-se concluir que o que causou as anomalias dos valores adquiridos nos cps da face a sotavento poderá ter sido um rácio de blocagem não favorável.



**Figura 5.39- Comparação dos Cps obtidos para os três casos de estudo na distância ao redor do cubo na face barlavento**





## Capítulo 6

### 6. Conclusões

Neste trabalho, pretendeu-se abordar a problemática da camada limite atmosférica no cálculo da ação do vento em edifícios. Para a realização de tal, pretendeu-se incorporar elementos de rugosidade já presentes no laboratório de Fluidos e Termodinâmica da FCT-UNL, realizando um processo inverso na construção da componente experimental ao proposto por Irwin [1], ou seja, partiu-se dos elementos de rugosidade para se descobrir as dimensões dos pináculos necessárias.

Tendo isto em consideração inicialmente realizou-se um estudo para um terreno tipo 4 com pináculos grandes, de modo a se verificar se se conseguia recriar com precisão a experiência realizada por Irwin. Neste estudo conseguiu-se igualar a espessura da CLA experimental à espessura de CLA de projeto, obtendo-se ainda um  $\alpha$  15% inferior ao valor de projeto, sendo que para estudos experimentais é um erro aceitável. Provando-se que os resultados obtidos corresponderam ao esperado.

De seguida realizaram-se mais dois estudos de tipo de terreno 2 para dois tipos de pináculos diferentes, onde se verificou que as espessuras das CLA experimental foram atingidas a  $x = 2,10m$ , ao invés do previsto  $x = 4,10m$ , isto poderá ter influência por estes estudos não respeitarem os limites sugeridos por Irwin. No entanto seria necessário realizar mais estudos ao comportamento do escoamento, nomeadamente à turbulência do mesmo, de modo a se tentar entender o que poderá estar a causar a criação da espessura da CLA cerca de 50% antes da distância desejada.

Das medições experimentais dos coeficientes de pressão num cubo com 20 cm de lado conclui-se que as localizações dos valores mínimos (Cps negativos) e máximos (Cps positivos), registados ao longo da face frontal e do teto do modelo cúbico iam de encontro aos reportados em estudos idênticos contidos na literatura.

No entanto os valores dos resultados obtidos para os valores de Cps foram um pouco díspares dos valores obtidos pelas referências bibliográficas, no entanto isto poderá advir do tipo de terreno estudado e da espessura de camada limite testada, ou ainda da localização escolhida para as medições da pressão estática num ponto do escoamento não perturbado, podendo isto fazer os valores dos Cps diferirem. No entanto na face a sotavento, verificou-se uma uniformidade nos valores dos Cps obtidos, o que não vai de encontro com a literatura. Esta disparidade poderá ter a ver com o rácio de blocagem que se faz sentir entre o túnel e o modelo cúbico.

### **6.1 Trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, propõe-se a introdução de outros modelos de edifícios com a mesma ou diferentes geometrias; testar o modelo cúbico para diferentes direções de escoamento, alterando o ângulo de incidência do modelo; testar outros tipos de terrenos.

## Bibliografia

- [1] H. P. A. H. Irwin, "The design of spires for wind simulation," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 7, no. 3, pp. 361–366, 1981.
- [2] J. Counihan, "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel," *Atmos. Environ.*, vol. 3, no. 2, pp. 197–214, 1969.
- [3] J.R. Garratt, *The atmospheric Boundary Layer*, Cambridge University Press, New York, 1992.
- [4] 1-4 Eurocódigo, "Eurocódigo 1. Ações em estruturas. Ações gerais. Ações do vento," 2010.
- [5] E. C. Wai-fah, *Handbook of Structural Engineering*. Boca Raton: CRC Press. pp. 12-50. ISBN 0-8493-2674-5, 1997.
- [6] J. C. Phillips, N. H. Thomas, R. J. Perkins, and P. C. H. Miller, "Wind tunnel velocity profiles generated by differentially-spaced flat plates," vol. 80, pp. 253–262, 1999.
- [7] U. N. De Lisboa, "Interacção de um corpo cúbico," 1997.
- [8] P. Song, "Simulation of Atmospheric Boundary Layer in an Open-Loop Wind Tunnel Using Spire-Roughness- Element Technique," 2017.
- [9] R. T. Terms, "NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC Rationale for determining design wind velocities," 1960.
- [10] C. Dyrbye, S. O. Hansen - *Wind Loads on Structures*. ISBN: 978-0-471-95651-8. 244 pages, 1997.
- [11] VDI guideline 3783, Part 1: Dispersion of pollutants in the atmosphere; dispersion of emissions by accidental releases; safety study, Issue: 07/1990, (1987).
- [12] H. Lettau, Note of aerodynamic roughness parameter estimation on the basis of roughness-element description. *Journal of applied meteorology*, Volume 8, 1969.
- [13] J. D. Holmes, *Wind Loading of Structures* (2nd). ISBN 0-419-24610-X, 2007, p.167.
- [14] O. Pr and Z. Hk, "The production of uniform shear flow in a wind tunnel," no. May, 1957.
- [15] J. K. Marshall, "DRAG DUE TO REGULAR ARRAYS OF," vol. 5, pp. 285–308, 1973.
- [16] L. O. W. S. *Aerodynamics et al.*, "REPORT RAPPORT LTR-LA-94 A SPIRE ARRAY

FOR GENERATING THICK TURBULENT SHEAR LAYERS FOR NATURAL WIND SIMULATION.”

- [17] N. A. Rahmat, A. Hagishima, N. Ikegaya, and J. Tanimoto, “Experimental Study on Effect of Spires on the Lateral Nonuniformity of Mean Flow in a Wind Tunnel Experimental Study on Effect of Spires on the Lateral Nonuniformity of Mean Flow in a Wind Tunnel,” vol. 5, no. 1, pp. 1–15, 2018.
- [18] “THE SIMULATION OF THE ATM ~ SPHE ~ C LAYER IN A WIND TUNNEL,” vol. 2, pp. 49–71, 1968.
- [19] P. S. Jackson, “Wakes behind two-dimensional surface obstacles in turbulent boundary layers,” vol. 64, 1974.
- [20] N.J. COOK, Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing- Device Methods\*,” vol. 3, pp. 157–176, 1978.
- [21] C. Ip, “Relaxing wakes behind surface-mounted obstacles in rough wall boundary layers,” vol. 93, pp. 631–659, 1979.
- [22] F. Mechanics, W. E. Program, and F. Collins, “Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons,” vol. 62, pp. 37–56, 1996.
- [23] M. Pavageau and M. Schatzmann, “Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon,” vol. 33, pp. 3961–3971, 1999.
- [24] C. Farell and A. K. S. Iyengar, “Experiments on the wind tunnel simulation of atmospheric boundary layers,” vol. 79, pp. 11–35, 1999.
- [25] A. K. S. Iyengar and C. Farell, “Experimental issues in atmospheric boundary layer simulations : roughness length and integral length scale determination,” vol. 89, pp. 1059–1080, 2001.
- [26] T. Balendra, D. A. Shah, K. L. Tey, and S. K. Kong, “Evaluation of flow characteristics in the NUS-HDB Wind Tunnel,” vol. 90, pp. 675–688, 2002.
- [27] H. A. Al-nehari, A. K. Abdel-rahman, and A. El-moneim, “DESIGN AND CONSTRUCTION OF A WIND TUNNEL,” vol. 38, no. 1, pp. 177–193, 2010.
- [28] H. Kozmar, “Improved Experimental Simulation of Wind Characteristics around Tall Buildings,” no. OCTOBER, pp. 670–679, 2012.
- [29] T. C. Hohman, T. Van Buren, L. Martinelli, and A. J. Smits, “Generating an artificially thickened boundary layer to simulate the neutral atmospheric boundary layer,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 145, pp. 1–16, 2015.
- [30] J. C. H Cheung, M. Eaddy, W.H. Melbourne, Active generation of large scale turbulence in a boundary layer wind tunnel, Australasian Wind Engineering Society Workshop (10th:2003:Sydney, Australia), 2003.
- [31] J. Pang, Z. Lin, Development and experimental study on the active simulation device in boundary layer wind tunnel. Journal of experiments in fluid mechanics. Vol.22 No.3, Sep.2008.
- [32] S. Cao, A. Nishi, and H. Kikugawa, “Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel,” vol. 90, pp. 1719–1729, 2002.
- [33] A. M. Aly and H. Gol-Zaroudi, “Atmospheric boundary layer simulation in a new open-jet facility at LSU: CFD and experimental investigations,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 110, pp. 121–133, 2017.
- [34] I. S. Gartshore, . “RoughnessElement Geometry Required for Wind Tunnel : Simulations



of the,” 1977.

- [35] S. Gilooly and G. Taylor-power, “Physical Modeling of the Atmospheric Boundary Layer in the University of New Hampshire ’ s Flow Physics Facility Physical Modeling of the Atmospheric Boundary Layer in the University,” 2016.
- [36] P. P. Pancholy, K. Clemens, P. H. Geoghegan, and M. Jermy, “Numerical Study of Flow and Pedestrian Level Wind Comfort Inside Uniform,” no. March, 2017.
- [37] H. Irtaza, R. G. Beale, M. H. R. Godley, and A. Jameel, “Comparison of wind pressure measurements on Silsoe experimental building from full-scale observation , wind-tunnel experiments and various CFD techniques,” vol. 5, no. 1, pp. 28–41, 2013.
- [38] C. Ip and R. Ag, “The f l o w around a surface-mounted cube i n uniform and turbulent streams,” vol. 79, 1977.
- [39] N. Ho, “Towards quality assurance for wind tunnel tests : A comparative testing program of the Windtechnologische Gesellschaft,” vol. 76, 1998.
- [40] P. J. Richards, R. P. Hoxey, B. D. Connell, and D. P. Lander, “Wind-tunnel modelling of the Silsoe Cube,” vol. 95, pp. 1384–1399, 2007.
- [41] W. S. A. Safety, W. Grove, A. Road, and S. Kt, “EVALUATION OF CFD MODELLING OF GAS DISPERSION NEAR BUILDINGS AND COMPLEX TERRAIN,” no. 144, pp. 293–304.
- [42] I. R. Cowan, I. P. Castro, and A. G. Robins, “Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings,” vol. 68, 1997.
- [43] C. Petit, *BEST PRACTICE GUIDELINE FOR THE CFD SIMULATION OF FLOWS IN THE URBAN ENVIRONMENT QUALITY ASSURANCE AND IMPROVEMENT OF*, no. May. 2007.
- [44] B. Blocken, “Computational Fluid Dynamics for urban physics : Importance , scales , possibilities , limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations,” *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 219–245, 2015.
- [45] J. Pang, Z. Lin, development and experimental study on the active simulation device in boundary layer wind tunnel. *Journal of experiments in fluid mechanics*. Vol. 22, No. 3, Sep.2008